



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

✓ **DIVISION DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**

✓ **POTENCIALES EVOCADOS Y PROCESAMIENTO NO-LINEAL
DE INFORMACION INTERSENSORIAL**

TESIS QUE PRESENTA :

✓ **ANGEL TOMAS ALJAMA CORRALES**

**PARA OBTENER EL GRADO
✓ DE DOCTOR EN CIENCIAS**

ASESOR

DR. JORGE I. AUÑON ✓

AGOSTO DEL 2001 ✓

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi familia.....porque siempre se queda algo en la casa de los padres, a mi asesor el Dr. Jorge I. Auñón que como parte de su vida me dedicó varios momentos, a mi esposa Sonia Charleston por su apoyo y por compartir su vida conmigo, y a mis amigos que constantemente me animaron a terminar esta tesis, que me han mostrado que la vida es bella, por los momentos compartidos y por estar presente en las etapas más intensas de mi hipocondría.

Angel Tomás Aljama Corrales

Agosto del 2001

POTENCIALES EVOCADOS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACION INTERSENSORIAL

INDICE

Resumen	1
Capítulo I	
Procesamiento de Información Intersensorial	4
1.1. Introducción	4
1.2. Planteamiento del Problema	5
1.3. Relevancia y Objetivos	10
1.4. Organización de la Tesis	11
Capítulo II	
Interacciones Sensoriales	14
2.1. Introducción	14
2.2. Estado del Arte	15
2.3. Discusión	37
Capítulo III	
Potenciales Evocados Unimodales y Multisensoriales	39
3.1. Introducción	39
3.2. Componentes del Potencial Evocado Auditivo	40
3.3. Componentes del Potencial Evocado Visual	46
3.4. Modelo Cronométrico del Potencial Evocado Unimodal	48
3.5. Potenciales Evocados en el Análisis de Información Intrasensorial e Intersensorial	51
3.6. Propuesta de un Análisis Segmentado del Potencial Evocado Bimodal en Términos de los Potenciales Evocados Visuales y Auditivos	59
3.7. Concepto del Fenómeno de Interacción Sensorial	62
3.8. Discusión	66
Capítulo IV	
Análisis de Potenciales Evocados Multisensoriales Mediante Modelos No-Lineales	67
4.1. Introducción	67
4.2. Identificación de Sistemas No-Lineales	68

IV.2.1. Filtro de Volterra	69
IV.2.2. Modelo No-Lineal Autorregresivo de Promedio Móvil con Entradas Exógenas (NARMAX)	74
IV.2.2.1. Introducción	74
IV.2.2.2. Problema Básico	76
IV.3. Modelo NARMAX	79
IV.4. Resultados del Modelo NARMAX con Datos Sintetizados	89
IV.5. Conclusiones	92
 Capítulo V	
Problemas de Sobreparametrización y Validación del Modelo NARMAX	93
V.1. Introducción	93
V.2 Concepto de Agrupamiento (“Clustering”) en Modelos No-Lineales	93
V.3. Procedimiento de Validación del Modelo NARMAX	96
V.4. Resultados del Agrupamiento y Pruebas de Validación en Modelos NARMAX con Datos Sintetizados	103
V.5. Conclusiones	107
 Capítulo VI	
Formulación Matemática del Fenómeno Intersensorial y Metodología Propuesta para el Modelado del Potencial Evocado Bimodal	109
VI.1. Introducción	109
VI.2. Modelo del Potencial Evocado Bimodal	112
VI.3. Formulación Matemática No-Lineal del Fenómeno de Interacción entre las Vías Sensoriales Visual y Auditiva	112
VI.4. Problemas de Sobre-Parametrización en el Modelo del Potencial Evocado Bimodal	117
VI.5. Metodología para Obtener un Modelo de la Relación No-Lineal entre Vías Sensoriales	121
VI.5.1. Selección de la Estructura No-Lineal	121
VI.6. Resultados del Modelo NARMAX con Datos Sintetizados	124
VI.7. Conclusiones	129
 Capítulo VII	
Diseño de Paradigmas Utilizados en el Análisis del Fenómeno Intersensorial	130
VII.1. Introducción	130
VII.2. Experimento # 1	132
VII.2.1 Objetivo	132
VII.2.2. Método	133
VII.2.3. Potenciales Evocados Adquiridos	135

VII.2.4 Conclusiones	145
VII.3. Experimento # 2	147
VII.3.1 Objetivo	147
VII.3.2. Método	147
VII.3.3. Potenciales Evocados Adquiridos	150
VII.3.4 Conclusiones	160
VII.4. Experimento # 3	161
VII.4.1 Objetivo	162
VII.4.2. Método	162
VII.4.3. Potenciales Evocados Adquiridos	165
VII.4.4 Conclusiones	174
VII.5. Experimento # 4	176
VII.5.1 Objetivo	176
VII.5.2. Método	176
VII.5.3. Potenciales Evocados Adquiridos	180
VII.5.4 Conclusiones	188
VII.6. Experimento # 5	190
VII.6.1 Objetivo	190
VII.6.2. Método	190
VII.6.3. Potenciales Evocados Adquiridos	194
VII.6.4 Conclusiones	204
VII.7. Experimento # 6	205
VII.7.1 Objetivo	205
VII.7.2. Método	205
VII.7.3. Potenciales Evocados Adquiridos	209
VII.7.4 Conclusiones	218
VII.8. Discusión General	219

Capítulo VIII

Resultados y Discusión del Modelo No-Lineal: Aplicación al Fenómeno Intersensorial

VIII.1. Introducción	220
VIII.2. Experimento # 1	222
VIII.2.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz	223
VIII.2.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	226
VIII.2.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	230
VIII.3. Experimento # 2	241
VIII.3.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz	242
VIII.3.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	247
VIII.3.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	250
VIII.4. Experimento # 3	265
VIII.4.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz	266
VIII.4.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	272

VIII.4.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	279
VIII.5. Experimento # 4	297
VIII.5.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz	299
VIII.5.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	305
VIII.5.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	313
VIII.6. Experimento # 5	324
VIII.6.1. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	325
VIII.6.2. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	330
VIII.7. Experimento # 6	341
VIII.7.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz	343
VIII.7.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados	349
VIII.7.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal	352
 Capítulo IX	
Discusión y Conclusiones	367
 Bibliografía	374

NOMENCLATURA

En la presente tesis se ha realizado un esfuerzo por utilizar de forma consistente símbolos, operadores y nombres de variables. Sin embargo, existen excepciones que se apartan de los lineamientos generales que a continuación se proporcionan. En consecuencia, en cada capítulo se realiza un esfuerzo adicional por establecer una notación adecuada.

Vectores y matrices

Si no se establece de otra forma, los vectores son vectores columnas denotados por letras minúsculas y negrillas, por ejemplo

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = [x_1 \ x_2 \ \dots x_n]^t,$$

en donde t denota la operación de obtener el vector transpuesto. Las matrices se denotan por letras mayúsculas y negrillas de la forma

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_m],$$

en donde \mathbf{x}_j representa la j -ésima columna de \mathbf{X} . Un caso especial de matriz utilizada en la presente tesis es la matriz triangular superior

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1M} \\ 0 & 1 & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2M} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \alpha_{M-1M} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Operadores

Si el operador no es un par de delimitadores, como el operador valor absoluto, el operador es seguido por su argumento entre paréntesis. El tipo de paréntesis cambia de operador a operador.

Operadores no mencionados en la siguiente lista se introducen en el texto en su primera mención.

$E\{z\}$	Valor esperado de la variable estocástica z .
$ z $	Valor absoluto de z .
$\text{tr}\{A\}$	Trazo de la matriz A .
$\ z\ $	Norma euclidiana del vector z .
$\langle w, z \rangle$	Producto interno de los vectores w y z .
$\cup\{\Omega\}$	Unión de grupos de coeficientes.
$E\{z\}$	Energía de la señal z .

Abreviaturas y significado de términos

En el texto algunos términos utilizados frecuentemente se abrevian. En la primera ocurrencia el término se escribe en forma completa seguido por el acrónimo entre paréntesis. Posteriormente, el acrónimo se utiliza en lugar del término excepto cuando la oración lo requiere de otra forma. A continuación se presenta la lista de acrónimos en mayúsculas y además se incluye el significado de algunos anglicismos utilizados en la tesis.

AEP	Potencial evocado auditivo
ABEP	Potencial evocado bimodal adquirido
ARMAX	Modelo autorregresivo de promedio móvil con entradas exógenas
BEP	Potencial evocado bimodal
ERP	Potencial evocado relacionado
EEG	Señal de electroencefalograma
EP	Potencial evocado
ISI	Intervalo entre estímulos
MGS	Método modificado de Gram-Schmidt
MSE	Error cuadrático medio
MIMO	Sistemas de entradas y salidas múltiples
MMN	Actividad eléctrica obtenida restando las respuestas en diferentes condiciones experimentales
NA	Componente endógeno del potencial evocado
Nd	Actividad eléctrica obtenida restando la actividad generada por un estímulo al considerarlo relevante e irrelevante
NARMAX	Modelo no-lineal autorregresivo de promedio móvil con entradas exógenas
RT	Tiempo de reacción
SISO	Sistema de una entrada y una salida.
SBEP	Potencial evocado bimodal sintetizado
VEP	Potencial evocado visual
Cluster	Agrupamiento de regresores
Latencia	Tiempo de ocurrencia de la actividad eléctrica en el potencial evocado
Facilitación	Ayuda entre vías sensoriales.
Flash	Estímulo visual correspondiente a una luz intensa
Click	Estímulo auditivo correspondiente a un sonido de corta duración
Catch Trials	Estímulo para evitar la generación de una estrategia de decisión
Target	Estímulo en donde el sujeto debe realizar una tarea
Model Goodness	Bondad del modelo
One Step-Ahead Prediction	Predicción hacia adelante de un solo paso
Parsimonious Model	Modelo de estructura mínima

RESUMEN

Generalmente se acepta que la información que se recibe en una vía sensorial puede influenciar la información en otra vía sensorial. Sin embargo, en nuestra experiencia cotidiana rara vez experimentamos estimulación sensorial en una sola vía. Normalmente dos o más modalidades pueden llevar información acerca del mismo evento o diferentes modalidades pueden ser estimuladas por diferentes eventos. Las vías sensoriales se han estudiado en forma aislada y en consecuencia, se ha obtenido un entendimiento parcial del total de sus capacidades y su impacto sobre la función cognoscitiva. En estimulación multisensorial algunas preguntas concernientes al lugar y al tipo de interacción sensorial aún quedan por responderse y no existe consenso acerca de los mecanismos involucrados en la percepción de un evento en una vía sensorial cuando existe estimulación concurrente en otra u otras vías sensoriales.

El objetivo del presente trabajo es investigar los efectos de la estimulación multimodal por medio de técnicas electrofisiológicas, información conductual y la teoría de sistemas no-lineales. Particularmente, se estudian los efectos cognoscitivos presentes en los potenciales evocados unimodales y bimodales, y el desempeño del sujeto cuando se le asigna una tarea específica. El fenómeno intersensorial se analiza utilizando información electrofisiológica de las vías auditiva y visual, información obtenida a partir de una batería de experimentos que incluyen como variable la dificultad de la tarea asignada al sujeto.

En la práctica, históricamente se han utilizado modelos con estructuras lineales debido a que

los resultados obtenidos con estructuras del tipo no-lineal han sido limitados. En consecuencia, los modelos no-lineales se han considerado importantes desde el punto de vista teórico. Sin embargo, existe el consenso de que los modelos con estructuras lineales representan aproximaciones de la mayoría de los fenómenos que se originan en situaciones reales. La versión polinomial del modelo NARMAX ("Non-Linear Autoregressive Moving Average with Exogenous Inputs") se utiliza en este trabajo para describir el potencial evocado bimodal en términos de las actividades visual y auditiva.

En el modelo propuesto, el potencial evocado bimodal no se considera como la simple superposición de los dos potenciales evocados unimodales, por hipótesis, el potencial evocado bimodal se propone caracterizarlo como la suma de información modificada y combinada de los potenciales auditivos y visuales. En consecuencia, el concepto del fenómeno intersensorial se redefine en el siguiente sentido: el fenómeno se genera únicamente cuando es necesario expresar el potencial evocado bimodal como una función no-lineal de los potenciales unimodales, es decir, en la descripción del sistema existen productos cruzados de información auditiva-visual. Sin embargo, en la identificación de sistemas, un aspecto importante es evitar generar modelos sobreparametrizados debido a que tienden a ocultar la dinámica del sistema, en consecuencia, también se propone una metodología que intenta resolver el problema de sobreparametrización.

Para la presente investigación se diseñaron seis paradigmas con el objetivo de encontrar evidencia electrofisiológica de la interacción entre las vías sensoriales auditiva y visual. Los paradigmas se diseñaron con la idea de decrementar gradualmente la discriminabilidad del estímulo relevante, es decir, la dificultad de la tarea asignada al sujeto se incrementa gradualmente a través de

los experimentos.

El análisis del fenómeno intersensorial se realiza en ventanas de tiempo definidas de acuerdo a la posible relación temporal de los componentes exógenos y endógenos del potencial evocado con diferentes procesos de la información. Los resultados del modelo no-lineal se presentan enfatizando la contribución lineal y no-lineal en la descripción del potencial evocado bimodal. En particular, el fenómeno intersensorial se obtiene al sumar productos de información visual y auditiva, además el índice de no-linealidad propuesto se utiliza para establecer la dependencia espacial del fenómeno intersensorial.

PROCESAMIENTO DE INFORMACION INTERSENSORIAL

I.1. Introducción

En el presente trabajo el objetivo es investigar los efectos de la estimulación multimodal por medio de técnicas electrofisiológicas e información conductual. Particularmente, se estudian los efectos cognoscitivos presentes en los potenciales evocados unimodales y bimodales, y el desempeño del sujeto cuando se le asigna una tarea específica. El fenómeno intersensorial se analiza utilizando información electrofisiológica de las vías auditiva y visual, información obtenida a partir de una batería de experimentos que incluyen como variable la dificultad de la tarea asignada al sujeto.

Estudios del tipo paramétrico se utilizan para definir y caracterizar los principales mecanismos en el fenómeno intersensorial. La caracterización temporal del potencial evocado bimodal, en términos de las actividades unimodales auditiva y visual, puede ser una guía para entender mejor el fenómeno bajo estudio. Los resultados de varios experimentos podrían conducir a una redefinición del fenómeno intersensorial así como la forma de cuantificar su importancia y magnitud.

En general, el uso de técnicas tradicionales de procesamiento de señales no ha sido suficiente para establecer las contribuciones individuales de las trayectorias sensoriales en la génesis del potencial evocado multisensorial. En la presente investigación se proponen técnicas del tipo no-lineal para evidenciar los posibles mecanismos de interacción entre las trayectorias sensoriales unimodales. Particularmente, se explora la teoría de modelos no-lineales autorregresivos de promedio móvil con entradas exógenas (NARMAX) para establecer la función de transferencia entre la actividad eléctrica

obtenida con estimulación bimodal y con estimulación unimodal. A partir del modelo no-lineal se espera que se puedan generar hipótesis que permitan mejorar las formulaciones teóricas acerca del fenómeno intersensorial.

1.2. Planteamiento del Problema

Generalmente se acepta que la información que se recibe en una vía sensorial puede influenciar la información en otra vía sensorial. Ciertamente, en nuestra experiencia cotidiana rara vez experimentamos estimulación sensorial en una sola vía. Normalmente dos o más modalidades pueden llevar información acerca del mismo evento o diferentes modalidades pueden ser estimuladas por diferentes eventos. Sin embargo, las modalidades sensoriales se han estudiado en forma aislada desde diferentes puntos de vista, anatómicos, fisiológicos y de la percepción de un evento. En consecuencia, examinar cada vía en forma independiente resulta en un entendimiento parcial del total de sus capacidades y su impacto sobre la función cognoscitiva. Hasta la fecha, diferentes investigaciones se han enfocado en entender como la percepción de un evento es modificado por la actividad concurrente en otras trayectorias sensoriales [1, 2]. Esta área del conocimiento se ha llamado "Interacción Intersensorial". Welch definió la interacción sensorial como la situación en donde la percepción de un evento, medido en términos de una vía sensorial, es modificado en alguna forma por la actividad concurrente en otras vías sensoriales [3]. Un problema que se tiene en este campo de la investigación es la ausencia de una unidad común para medir la percepción de un evento en diferentes modalidades. Mientras que un evento auditivo se mide en dB, un evento visual se mide en $\text{cd}\cdot\text{m}^2$. El problema anterior se ha evitado utilizando la información proporcionada por el tiempo de reacción, es decir, que tan rápido responde un sujeto cuando se estimula una trayectoria sensorial en particular

[1, 3-5]. Sin embargo, el tiempo de reacción es una medida global y no proporciona información de la relación entre las trayectorias sensoriales involucradas en la percepción de un evento [6, 7]. El fenómeno intersensorial se ha evidenciado por tiempos de reacción cortos en la detección de estímulos relevantes. Resultados experimentales muestran que ocurre un decremento en el tiempo de reacción cuando el estímulo relevante es precedido o presentado simultáneamente con información en otra vía sensorial. Particularmente, la estimulación concurrente auditiva-visual ha generado tiempos de reacción más cortos en comparación con los obtenidos por estimulación unimodal auditiva o visual [3, 8].

La técnica de potenciales evocados relacionados (ERP) se ha considerado como una herramienta que puede ayudar a entender los procesos mentales y las diferentes etapas de información que se generan bajo diversas condiciones de estimulación [9-11]. Los ERPs son pequeñas fluctuaciones de voltaje en el electroencefalograma (EEG) que están sincronizadas a ciertos eventos. Los ERPs representan la manifestación de patrones de actividad neuronal como resultado del procesamiento cerebral a un estímulo específico y constituyen una de las pocas técnicas posibles para registrar actividad eléctrica neuronal relacionada con la percepción de eventos.

A la fecha, los investigadores se han enfocado principalmente al estudio del fenómeno de interacción que se genera dentro de una vía sensorial [9, 10]. Con el propósito de obtener evidencia electrofisiológica de los posibles mecanismos involucrados se han propuesto paradigmas en donde se asigna una tarea al sujeto. La idea es presentar estímulos con diferentes atributos o dimensiones, es decir, si el objetivo es estudiar el fenómeno intrasensorial visual los atributos del estímulo pueden

ser definidos en términos del color, localización espacial, orientación, etc. Es importante recordar que utilizando información conductual y electrofisiológica se ha encontrado especificidad neuronal para varias dimensiones visuales [12]. Se ha establecido especificidad neuronal para la información relacionada con la localización, movimiento, color, frecuencia espacial y orientación. Sin embargo, persiste el cuestionamiento de si las trayectorias neuronales procesan la información en forma independiente o existe cierta interacción en la percepción del evento [10]. Algunos estudios han reportado interdependencia entre ERPs obtenidos al seleccionar diferentes atributos de un estímulo base en una vía sensorial. El interés se ha enfocado en establecer si los atributos del estímulo son seleccionados y procesados en forma independiente o son combinados y procesados en forma más compleja. Hansen e Hillyard propusieron un esquema para inferir la interdependencia de información electrofisiológica obtenida por paradigmas que incluyen dos atributos del estímulo base [9]. Por ejemplo, asumiendo que se desea inferir la interdependencia entre los atributos de tono y localización del estímulo, el paradigma podría incluir la presentación de los estímulos alta frecuencia-oído derecho, alta frecuencia-oído izquierdo, baja frecuencia-oído derecho y baja frecuencia-oído izquierdo. Si la condición de alta frecuencia, representada por A+ , es relevante y la condición oído derecho, representada por B+, es relevante y los atributos A y B se juntan, es decir, el sujeto tiene que responder a una combinación específica de estímulos, entonces se forma un conjunto de combinaciones de estímulos: (1) ambas características son relevantes (A+/B+), (2) el atributo A es relevante (A+/B-), (3) el atributo B es relevante (A-/B+), (4) ambos atributos no son relevantes (A-/B-). El análisis de dependencia de las etapas de procesamiento de información puede realizarse restando los potenciales evocados asociados con las cuatro posibles combinaciones de estímulos. Por ejemplo, la diferencia de los potenciales evocados $EP\{A+/B-\} - EP\{A-/B-\}$ representa la actividad

electrofisiológica asociada con el proceso de selección del atributo A. Si los atributos de tono y localización son seleccionados y procesados en forma independiente entonces el potencial evocado asociado con el atributo del tono no debe diferir como una función de la relevancia del atributo de la localización, es decir la siguiente relación debe mantenerse:

$$ERP\{A+/B+\} - ERP\{A-/B+\} = ERP\{A+/B-\} - ERP\{A-/B-\}.$$

Escribiendo la ecuación anterior de la forma:

$$ERP\{A+/B+\} - ERP\{A-/B-\} = (ERP\{A+/B-\} - ERP\{A-/B-\}) + (ERP\{A-/B-\} - ERP\{A-/B+\}),$$

se sugiere que el efecto de la atención en la estimulación bimodal es igual a la suma de los efectos de las atenciones individuales, este comportamiento es conocido como modelo independiente o exhaustivo. En contraste, si el efecto de la localización del lado derecho es encontrado únicamente para el atributo relevante de alta frecuencia o viceversa, entonces se infiere una relación jerárquica. Un procesamiento jerárquico ocurre cuando la relevancia de alguno de los estímulos influye en el procesamiento de información en otra dimensión sensorial [9, 10].

Los modelos exhaustivos y jerárquicos representan dos tendencias en la interpretación de la forma en que los atributos son seleccionados o combinados. Por ejemplo, cuando un sujeto es estimulado por la combinación de dos atributos del estímulo base, la percepción puede ser considerada como la combinación de dos procesos independientes o como la combinación de dos procesos que interactúan y generan una respuesta diferente. Un modelo de procesamiento de la información en forma independiente predice que el nivel de un atributo no influye en el procesamiento de otros atributos concurrentes, mientras que un modelo jerárquico considera que los estímulos con atributos relevantes, seleccionados en etapas tempranas, deben recibir procesamiento adicional. En

el análisis del procesamiento de atributos, los términos “separables” e “integrables” son utilizados para denominar situaciones de procesamiento de la información en forma independiente o jerárquica, respectivamente [9].

Los paradigmas diseñados utilizando atributos del estímulo base han mostrado que en algunas condiciones experimentales el proceso de selección concuerda con un modelo jerárquico, con un modelo independiente o con su combinación. Por ejemplo, Hansen e Hillyard encontraron, utilizando un paradigma de tono-localización, evidencia de la existencia de un proceso más complejo que el sugerido por un modelo independiente [9]. Sin embargo, como se ha mencionado, en la experiencia perceptual cotidiana la percepción de un evento incluye el procesamiento de información de estímulos relevantes con diferentes atributos y por diferentes modalidades.

Posiblemente, el estudio de estimulación concurrente en diferentes modalidades genere un mejor entendimiento acerca del fenómeno de interacción en una vía sensorial. Es posible que se pueda inferir más información de una vía si se observan los efectos de otra vía superimpuesta. El traslape de actividades unimodales puede revelar si las modalidades sensoriales individuales son sensitivas a efectos externos o son modalidades sensoriales cerradas. Extendiendo el concepto del procesamiento de información descrito, información concurrente en diferentes vías sensoriales podría generar procesos independientes o procesos más complejos debido a la interacción de actividades. En estimulación multisensorial algunas preguntas concernientes al lugar y al tipo de interacción sensorial aún quedan por responderse, es decir, preguntas como: ¿la suma de los ERPs unimodales es igual al ERP bimodal?. Actualmente no existe consenso acerca de los mecanismos involucrados en la

percepción de un evento en una vía sensorial cuando existe estimulación concurrente en otra u otras vías sensoriales.

I.3. Relevancia y Objetivos

Hasta la fecha, preponderantemente el análisis de los potenciales evocados bimodales se ha enfocado únicamente en las distribuciones de amplitud de componentes específicos. En la presente investigación se persigue analizar los cambios morfológicos del potencial evocado bimodal en términos de los cambios morfológicos de los potenciales unimodales. El fenómeno intersensorial se estudia utilizando la información global en lugar de información a latencias específicas. Es deseable establecer que segmentos temporales del potencial evocado bimodal se afectan en forma jerárquica o independiente ante la existencia de información concurrente en vías sensoriales.

La relevancia del presente trabajo es el estudio del fenómeno intersensorial considerando paradigmas experimentales que incluyen estimulación de las trayectorias sensoriales auditiva y visual, en forma aislada y en forma concurrente. Uno de los aspectos importantes es formular el fenómeno intersensorial en términos de la teoría de sistemas no-lineales. En lugar de considerar la amplitud del potencial generado por el atributo relevante del estímulo base, como se ha realizado en varias investigaciones, el potencial bimodal se expresa como una combinación lineal y no-lineal de las actividades unimodales.

La definición del fenómeno intersensorial fue originalmente asignada para describir la situación en donde la actividad concurrente, en una segunda o más modalidades, modifica la

percepción de un evento. Actualmente, se asume que el fenómeno intersensorial se genera cuando el potencial evocado bimodal sintetizado por la suma de las actividades unimodales difiere del potencial evocado bimodal adquirido [3]. El concepto anterior de interacción no considera los mecanismos fisiológicos involucrados y además no permite un modelo más complejo entre actividades unimodales. En consecuencia, en la presente investigación se propone estudiar el fenómeno intersensorial describiendo la actividad bimodal con un modelo más complejo que la simple suma de actividades unimodales. En términos de la teoría de sistemas, la descripción de la salida de un sistema como la suma de las entradas es la estructura más simple de un sistema lineal. Sin embargo, es posible que un modelo lineal más complejo pueda ajustarse en situaciones de estimulación multimodal, reflejando procesos de información independientes. En el presente trabajo, el fenómeno intersensorial se redefine en el siguiente sentido: el fenómeno se genera únicamente cuando es necesario expresar el potencial bimodal como una función no-lineal de los potenciales unimodales, es decir, en la descripción del sistema existen productos cruzados de información auditiva-visual.

I.4. Organización de la Tesis

El objetivo de la presente investigación es analizar el fenómeno intersensorial utilizando evidencia electrofisiológica, conductual y explorando la teoría de sistemas no-lineales. El Capítulo II se dedica a la descripción de los trabajos de investigación más representativos en el análisis del fenómeno intersensorial con el propósito de establecer la importancia del fenómeno bajo estudio. El capítulo inicia con las investigaciones realizadas manipulando los atributos del estímulo en una sola vía sensorial y continúa con la cita de los pocos trabajos utilizando estimulación multisensorial. Un punto importante es el análisis de los efectos del paradigma sobre los componentes del potencial

evocado debido a la asociación de los componentes con los diferentes mecanismos del procesamiento de la información. Por esta razón, en el Capítulo III se abordan los componentes exógenos y endógenos visuales y auditivos y su posible asociación con diferentes etapas de procesamiento de información. El establecer los posibles mecanismos del procesamiento de la información permite proponer un análisis en ventanas de tiempo con un inicio y final indexado por componentes exógenos y/o endógenos del potencial evocado. En la práctica, históricamente se han utilizado modelos con estructuras lineales debido a que los resultados obtenidos con estructuras del tipo no-lineal han sido extremadamente limitados. En consecuencia, los modelos no-lineales se han considerado importantes desde el punto de vista teórico. Sin embargo, existe el consenso de que los modelos con estructuras lineales representan aproximaciones de la mayoría de los fenómenos que se originan en situaciones reales. Por lo tanto, en el capítulo IV se analiza el desempeño de algunas técnicas no-lineales de identificación de sistemas. En este capítulo se establecen las bases teóricas necesarias para formular la descripción polinomial no-lineal conocida como modelo NARMAX, que es utilizado en la descripción del potencial evocado bimodal en términos de las actividades unimodales. Es importante considerar que un modelo sobreparametrizado tiende a ocultar la dinámica del sistema, en consecuencia, el Capítulo V se dedica a estudiar el problema de sobreparametrización del modelo NARMAX así como las pruebas de validación del modelo. En este capítulo se propone una metodología que intenta resolver el problema de modelos sobreparametrizados y se demuestra su eficacia al aplicarla en señales sintetizadas. El Capítulo VI se enfoca al modelado de la información electrofisiológica obtenida cuando se utiliza estimulación visual y auditiva en forma concurrente. El capítulo inicia con la descripción matemática de un modelo no-lineal que incluye las posibles interacciones entre las respuestas unimodales de las dos trayectorias sensoriales involucradas. En el

modelo propuesto el potencial evocado bimodal no se considera como la simple superposición de los dos potenciales evocados unimodales, por hipótesis, el potencial evocado bimodal se considera como la suma de información modificada y combinada de los potenciales auditivos y visuales. En el Capítulo VII se presentan los paradigmas diseñados para la presente investigación. El objetivo de los paradigmas es encontrar evidencia electrofisiológica de la interacción entre las vías sensoriales auditiva y visual, utilizando información de los potenciales evocados unimodales y bimodales. Los experimentos son diseñados con la idea de decrementar gradualmente la discriminabilidad del estímulo relevante, es decir, la dificultad de la tarea asignada al sujeto se incrementa gradualmente a través de los experimentos. En el capítulo VIII se presentan los resultados de los paradigmas considerados en el presente trabajo, al aplicar la formulación del fenómeno intersensorial en términos de información lineal y no-lineal obtenida a partir de la actividad unimodal visual y auditiva. El análisis se realiza en diferentes ventanas de tiempo definidas de acuerdo a los criterios propuestos en el Capítulo III. Los resultados del modelo no-lineal se presentan proporcionando la gráfica del potencial evocado bimodal sintetizado obtenido como la suma de las contribuciones lineales y no-lineales, la gráfica de la contribución no-lineal asociada con el fenómeno intersensorial y obtenida al sumar productos de información visual y auditiva, la gráfica de la suma de la actividad no-lineal generada por la vía auditiva o visual denominada fenómeno intrasensorial y la gráfica de la información obtenida al sumar la actividad intrasensorial y la actividad correspondiente a la parte lineal del modelo denominada modelo de sumación de energías. Finalmente, en el Capítulo IX se presentan las conclusiones del análisis del fenómeno intersensorial utilizando el índice propuesto de no-linealidad y representado en mapas topográficos.

INTERACCIONES SENSORIALES

II.1. Introducción

El objetivo de la presente tesis es investigar los efectos de estimulación multisensorial utilizando evidencia electrofisiológica e información conductual. Un objetivo específico es determinar el tipo de relación entre los potenciales evocados unimodales y el potencial evocado bimodal. Es importante establecer que las técnicas tradicionales de procesamiento de señales no han sido adecuadas para detectar los efectos sutiles de la información que se presentan en situaciones de interacción sensorial. Mas aún, las técnicas tradicionales no han permitido establecer la contribución de cada una de las vías sensoriales en la generación y por lo tanto en la explicación de la actividad multimodal.

Un mejor entendimiento de la naturaleza de la estimulación multisensorial podría tener un impacto importante. Es posible concebir varias áreas en donde podría representar una ventaja el estimular multisensorialmente. En el área de la educación, es posible que individuos con problemas auditivos y de aprendizaje se beneficien con formas alternativas de presentar la información. Pueden existir situaciones en donde en un canal de información exista una baja relación señal a ruido, originando que la detección y en consecuencia la comprensión de la información relevante sea difícil. Es posible que una estrategia de presentación de estímulos en forma bisensorial pueda incrementar la detectabilidad mediante mecanismos de interacción de un canal principal y un canal secundario. Mas aún, una mejor definición de las bases teóricas de la estimulación multisensorial puede conducir a la generación de modelos robustos para una variedad de situaciones clínicas, tal como el caso de

la dislexia.

II.2. Estado del Arte

El estado del arte en la estimulación bisensorial se puede establecer considerando las siguientes tendencias: (a) estudios basados en la superposición de los potenciales evocados unimodales, como los desarrollados por Morrel [13] y Elfner [14] y (b) experimentos que consideran una relación más complicada entre trayectorias sensoriales, tales como los trabajos de Shipley [2] y Cerutti [15]. Los siguientes párrafos se dedican a la descripción de los trabajos de investigación más representativos en el estudio del fenómeno intersensorial.

Hershenson realizó una de las primeras investigaciones de integración bisensorial [16]. El experimento se diseñó para estudiar los efectos de la asincronía en la presentación de los estímulos visuales y auditivos sobre el tiempo de reacción (RT). El RT se midió en tres condiciones de estimulación: (a) estimulación auditiva, (b) estimulación visual y (c) estimulación concurrente visual-auditiva. En la condición de estimulación concurrente, el estímulo auditivo se presentó simultáneamente con el estímulo visual o fue precedido por el estímulo visual por un tiempo de 5 a 85 milisegundos. Cuando los estímulos coincidieron temporalmente o el retraso fue de pocos milisegundos, los resultados mostraron que el RT bimodal es similar al RT auditivo, es decir, cuando el estímulo auditivo se presenta en forma aislada. Es importante recordar que los procesos fotoquímicos retardan los eventos en la vía visual aproximadamente en 40 milisegundos. El RT visual, en la condición de intervalo entre estímulos mayor a 40 milisegundos, fue similar al RT obtenido utilizando únicamente estimulación visual. Hershenson hipotetizó que con un intervalo entre estímulos

cercano a 40 milisegundos el RT bimodal debe ser más rápido que cualquier RT unimodal, ocurriendo el máximo efecto cuando Δt es igual la diferencia entre los RTs unimodales; en el trabajo de Hershenson se encontró evidencia de esta hipótesis.

Observaciones

Si el fenómeno intersensorial es medido en términos de los RTs unimodales y bimodales los resultados de Hershenson demostraron la existencia del fenómeno intersensorial en condiciones de estimulación bisensorial. En asincronías en donde se encontró interacción, la desviación estándar del RT auditivo fue más pequeña que para el estímulo visual, además, la desviación estándar del RT bimodal fue más pequeña que las obtenidas para estimulación unimodal. Una posible explicación de la diferencia en desviaciones estándar se atribuye a que la tarea asignada al sujeto permitió responder al primer estímulo percibido. De hecho, el sujeto fue libre de responder a cualquiera de los estímulos unimodales. Es posible que en los experimentos de Hershenson se originó un RT bimodal más rápido debido a un efecto de sumación de energías en lugar de asociarlo con un fenómeno intersensorial.

En la investigación del fenómeno intersensorial son importantes los trabajos realizados por Grey Walter y L. Ciganek [17, 18]. La idea común fue encontrar el tipo de relación entre el bipotencial adquirido y el sintetizado a partir de las actividades unimodales. En estos trabajos se utilizaron diferentes intervalos inter-estímulos.

Grey Walter propuso la idea de que las señales en diferentes modalidades viajan por simple conducción a una área no específica de la corteza cerebral. Grey Walter mostró que cuando se presentan señales en diferentes modalidades, decrementando el intervalo entre sus inicios, el potencial

evocado bimodal puede sintetizarse mediante la suma y diferencias de las respuestas unimodales.

Ciganek sugirió estudiar el fenómeno de interacción sensorial considerando dos modalidades con el propósito de entender mejor las características morfológicas del potencial evocado bimodal. Los experimentos de Ciganek se diseñaron incluyendo un estímulo visual con duración de 50 milisegundos y un estímulo auditivo presentado en forma binaural. Para el estímulo bimodal, el estímulo auditivo precedió al estímulo visual con diferentes intervalos de tiempo. El sitio de registro fue Oz-Pz. Los resultados mostraron evidencia de una simple superposición de las respuestas unimodales, sin importar el retraso entre los inicios de los estímulos unimodales.

En contraste con las ideas de Grey Walter y L. Ciganek, Eijkman propuso uno de los primeros intentos para obtener una medida objetiva del fenómeno intersensorial, en su propuesta se consideró procesos más complejos que la simple suma de las actividades unimodales [19]. Eijkman sugirió que el sistema sensorial puede especificarse mediante su ruido interno. Si el ruido interno es característico de un canal sensorial, entonces es posible identificar el canal mediante su ruido. La hipótesis de Eijkman considera que si el ruido interno entre dos canales presenta correlación entonces se presume que los dos canales tienen una parte en común. Los experimentos de Eijkman se diseñaron para detectar incrementos en la amplitud o duración de las señales auditivas y visuales, la tarea del sujeto consistió en detectar si existía o no un incremento. En uno de sus experimentos las señales no presentaron incremento o presentaron un incremento de una magnitud considerable. El índice de detectabilidad de cada una de las señales se determinó en base al porcentaje de respuestas correctas, el porcentaje de respuestas falsas y la desviación estándar del ruido. Un incremento en la señal auditiva se denominó "A" mientras que un incremento en la señal visual se etiquetó como "V", un

estímulo con incrementos en ambas señales fue indicado como "AV" y el símbolo "O" se utilizó cuando no se presentó incremento. La tarea asignada al sujeto consistió en detectar los incrementos así como indicar el tipo de incremento. Por lo tanto, su respuesta fue "o", "a", "v" o "av". Con el propósito de evaluar la relación intersensorial se calcularon las diferentes probabilidades condicionales así como la determinación del índice de detectabilidad. En base al esquema que utilizó Eijkman, las interacciones sensoriales pueden ser descritas mediante las expresiones:

$$I_1 = [P(a/V) + P(av/V)] - [P(a/O) + P(av/O)]$$

$$I_2 = [P(v/A) + P(av/A)] - [P(v/O) + P(av/O)]$$

$$I_3 = [P(a/AV) + P(av/AV)] - [P(a/A) + P(av/A)]$$

$$I_4 = [P(v/AV) + P(av/AV)] - [P(v/V) + P(av/V)]$$

En donde, la probabilidad de la respuesta "av" después de la presentación del estímulo "A" se denomina $P(av/A)$, etc. Las primeras dos expresiones, I_1 e I_2 , se relacionan con respuestas equivocadas. La primera parte de I_1 proporciona la probabilidad de la respuesta "a" cuando se presenta el estímulo "V", mientras que la segunda parte se asocia con la probabilidad de "a" cuando no existe un incremento. $I_1 = 0$ significa que la probabilidad de obtener una respuesta falsa "a" no es influenciada por la presencia o ausencia de "V". Las expresiones I_3 e I_4 se asocian con la respuesta correcta. La primera parte de I_3 se relaciona con la probabilidad de la respuesta "a" cuando "A" y "V" están presentes mientras que la segunda parte se asocia con la probabilidad de la respuesta correcta "a" cuando únicamente se presenta "A". $I_3 = 0$ significa que la detectabilidad de "A" no depende de la presencia o ausencia de "V". Si $I_1 = I_2 = I_3 = I_4$ significa que no existe interacción alguna.

Las conclusiones, basada en los valores de I_1 a I_4 , indicaron que aparentemente no existe interacción entre la información auditiva y visual. Eijkman determinó el valor de la correlación cruzada utilizando las probabilidades de respuestas falsas y correctas y asumiendo que el ruido en ambos canales son normalmente distribuidos. Los resultados indicaron que las fluctuaciones en la detección de los estímulos auditivo y visual no están correlacionadas, sin embargo son característicos para los canales sensoriales investigados.

Observaciones

Los resultados de Eijkman no proporcionaron algún indicio de interacción sensorial, sin embargo lo importante es el intento de establecer una metodología para su evaluación. Además, Eijkman propuso que “si la detectabilidad de un estímulo es aumentada por la presencia de un segundo estímulo, entonces existe facilitación intersensorial”. Si además, la detectabilidad del segundo estímulo es aumentada por el primer estímulo, entonces se genera una facilitación mutua entre vías. En forma similar, si en lugar de un aumento existe una disminución de la detectabilidad entonces se genera un proceso de inhibición que puede ser en una vía o en ambas vías.

El siguiente paso en el análisis del fenómeno de interacción sensorial, utilizando evidencia electrofisiológica, consistió en asignar alguna relevancia a uno de los estímulos unimodales utilizados en el paradigma. En estos experimentos el sujeto tiene la tarea de responder a un estímulo unimodal, llamado estímulo primario o estímulo relevante, e ignorar la presencia de otro estímulo, llamado estímulo accesorio o estímulo irrelevante.

Morrel utilizó un paradigma flash-click para estudiar el efecto de un estímulo accesorio y de

esta forma analizar posibles efectos intersensoriales. Para prevenir que el sujeto respondiera al estímulo auditivo en lugar del estímulo visual, en algunas presentaciones el estímulo accesorio se presentó en forma aislada ("catch trials"). En el estímulo bisensorial el flash precedió al click por un tiempo de 20 a 120 milisegundos [13]. La tarea del sujeto consistió en responder al flash, presentado en forma aislada y combinada, y evitar su respuesta ante la presencia aislada del click. El efecto de la señal accesoria se evaluó mediante información neurofisiológica, representada por los potenciales evocados, e información conductual representada por el tiempo de reacción. Dos aspectos se investigaron: (a) cambios de amplitud en los potenciales evocados en términos de intervalos entre estímulos y (b) comparación de los potenciales evocados bisensoriales con la suma algebraica de las actividades unimodales. Tanto la amplitud del ERP como el RT mostraron una relación lineal con el intervalo entre estímulos, es decir, a intervalos cortos la amplitud fue mayor y el RT más rápido. Debido a la dificultad en identificar el máximo y el mínimo de los ERPs, se evaluaron las fluctuaciones de amplitud en términos de la suma acumulativa de los ERPs rectificadas. Es importante señalar que el análisis de amplitud se realizó en ventanas de tiempo con un inicio sincronizado con la presentación del estímulo visual a los 256 milisegundos y de 140 a 240 milisegundos. El fenómeno de facilitación se determinó utilizando la relación entre la suma acumulativa del potencial evocado bimodal rectificado y la suma acumulativa del potencial evocado bimodal sintetizado.

Los efectos de la señal accesoria pueden resumirse como sigue: para intervalos cortos la actividad bimodal fue mayor que la que predice un modelo aditivo, siendo más evidente el efecto en la segunda ventana de tiempo y en la región motora izquierda. Los tiempos de reacción apoyaron lo encontrado por las relaciones de actividades, es decir, se generaron tiempos de reacción más rápidos para intervalos más cortos. En los experimentos de Morrel es posible que la vía auditiva acelere los

procesos motores inicializados por el estímulo del flash.

La metodología seguida por Morrel consideró dos grupos de estudio, para el primer grupo se incluyeron siete condiciones de estimulación, seis de las cuales consistieron del flash seguido por el click con diferentes intervalos entre estímulos. La otra condición es la presentación del estímulo del flash en forma aislada. En el segundo grupo se incluyeron ocho condiciones de estimulación, siete de las cuales son idénticas a las del primer grupo y la restante es la presentación del click en forma aislada. Al sujeto se le solicitó evitar su respuesta en la octava condición de estimulación. Las diferentes condiciones fueron presentadas en forma aleatoria con la limitante de que no se repitiera un estímulo en forma inmediata. El intervalo entre estímulos (ISI) se seleccionó en un rango de 4 a 8 segundos.

Los resultados de Morrel mostraron que la amplitud de los potenciales evocados para los dos grupos variaron sistemáticamente con el intervalo entre estímulos, siendo mayor a intervalos más cortos. Las derivaciones C3-Cz y Cz-C4 son las únicas derivaciones simétricas disponibles para evaluar diferencias de los hemisferios izquierdo y derecho. Para ambos grupos, la actividad del lado izquierdo mostró una relación consistente con el intervalo entre estímulos, mientras que el lado derecho no cumple con esta correlación. El trabajo de Morrel mostró que en un experimento en donde el estímulo auditivo se presenta después del estímulo visual, y la tarea del sujeto es responder al estímulo visual, se reduce el tiempo de reacción. Morrel sugirió que existe una sumación fisiológica intersensorial que es mayor conforme el intervalo entre estímulos es más corto.

Observaciones

Estudios previos de interacción sensorial se habían limitado en el sentido de no asociación de

un significado conductal al estímulo. Es importante notar que en la investigación de Morrel el par de estímulos no tiene relación cognoscitiva y el sujeto es requerido a generar una respuesta en base a siete u ocho condiciones de estimulación. Además, la facilitación se evaluó de acuerdo con la relación entre la respuesta bisensorial adquirida y la sintetizada por la suma algebraica de las actividades unimodales. Sin embargo, este tipo de análisis es dependiente de la ventana temporal y no considera una relación más compleja entre las trayectorias sensoriales. Además, no se analizó la actividad cognoscitiva reflejada en el potencial evocado bimodal.

Dougherty estudió la integración de la información auditiva y visual [20]. En uno de sus experimentos, el reconocimiento del estímulo bimodal se midió como una función del reconocimiento de información unimodal en las vías auditiva y visual. Dougherty mostró que el desempeño bisensorial fue superior al que predice un modelo en donde se asume un procesamiento de la información en forma independiente. Dougherty sugirió que un "procesamiento integrativo" es la explicación al desempeño superior en la situación de estimulación bisensorial. Los estímulos consistieron de cincuenta sílabas sin sentido, formadas por la combinación de tres letras (consonante-vocal-consonante), con valores similares de asociatividad y pronunciabilidad. El valor de asociatividad se definió por el número de asociaciones provocadas por cada una de las sílabas, mientras que la pronunciabilidad se definió por la facilidad de pronunciación de la sílaba. Una sección de entrenamiento se formó con una serie de 300 presentaciones, 100 presentaciones auditivas, 100 presentaciones visuales y 100 con la combinación de los estímulos visuales y auditivos. Los estímulos se presentaron en forma aleatoria con la limitante de que en cada bloque un estímulo puede aparecer un máximo de 10 veces. Dougherty concluyó que se generó el fenómeno de facilitación debido a que

los valores de la probabilidad de detección bimodal fueron mayores a los que predice el modelo de sumación de actividades unimodales, Tabla II.I. Bajo el esquema de Dougherty, el comportamiento de independencia sensorial puede asumirse si se cumple la siguiente ecuación:

$$P(AV)=P(A) + P(V) - P(A)P(V)$$

Tabla II.I. Probabilidades adquiridas y teóricas.				
Sujeto	Visual (Corr./100)	Auditivo (Corr./100)	Bisensorial (Corr./100)	P(AV) Teórica
1	0.18	0.10	0.38	0.26
2	0.16	0.15	0.45	0.29
3	0.22	0.13	0.48	0.32
4	0.22	0.07	0.43	0.28

En un segundo experimento se utilizó información verbal para demostrar que cuando los estímulos auditivo y visual son cognoscitivamente equivalentes, el procesamiento bisensorial ocurre en forma integrativa. La equivalencia cognoscitiva se definió como la condición en donde los estímulos son funcionalmente idénticos. La tarea del sujeto consistió en reportar si el estímulo presentado correspondía a las sílabas sin sentido “tac” o “bell”. Cincuenta sílabas sin sentido más 25 sílabas “tac” y 25 sílabas “bell” fueron aleatoriamente asignadas a un bloque de 100 intentos con un intervalo entre estímulos de 15 segundos. A los estímulos auditivo, visual y bimodal se les sumó una cierta cantidad de ruido. Una condición bimodal B₁ se formó con señales correlacionadas, esto significa que si un “tac” se presentó en forma auditiva también se presentó en forma visual y viceversa, y en forma similar para la sílaba “bell”. La otra condición bimodal, llamada B₂, consistió de señales no correlacionadas, esto significa que si un “tac” se presentó auditivamente un “bell” se

presentó en forma visual. Después de la fase de entrenamiento, el experimento consistió de una serie de 400 intentos, 100 intentos auditivos, 100 visuales, 100 intentos B₁ y 100 intentos B₂.

Dougherty reportó sus resultados utilizando el índice de detectabilidad [20], en donde existe un procesamiento de la información independiente si se cumple la siguiente ecuación:

$$d_{AV} = [(d_A)^2 + (d_V)^2]^{1/2}$$

mientras que el caso de integrabilidad es representado por :

$$d_{AV} = d_A + d_V$$

Las gráficas mostradas por Dougherty indicaron que los valores del índice de detectabilidad obtenidos en la condición B₁ se ajustan mejor a un modelo $d_{AV} = d_A + d_V$, mientras que la condición B₂ es mejor representada por el modelo $d_{AV} = [(d_A)^2 + (d_V)^2]^{1/2}$.

Observaciones

A pesar de que Dougherty en sus experimentos cuidó el aspecto de equivalencia cognoscitiva entre los estímulos, el fenómeno de facilitación se midió en base a un parámetro global como lo es el índice de detectabilidad. Además, es importante tener en cuenta que Dougherty no consideró evidencia electrofisiológica en el análisis de la relación entre vías sensoriales.

El tiempo de reacción ha sido un parámetro importante para evaluar interacciones sensoriales, sin embargo su variabilidad sugiere utilizar formas alternativas de evaluar el fenómeno intersensorial. En este sentido, Squires y colaboradores se enfocaron al análisis del componente P300 de la respuesta evocada. El componente P300 se consideró como un posible índice del procesamiento de información bisensorial [21]. En palabras de Squires "The P300 might well prove to be a richer measure than

traditional indices of processing as reaction time (RT), P300 latency may index the time of occurrence of cognitive process, its scalp distribution may index the nature of the task, and P300 amplitude may index expectancy for the eliciting event.”

El paradigma de Squires incluyó estimulación auditiva, estimulación visual y estimulación bisensorial. En el paradigma se incluyeron dos posibles tipos de estímulos, un estímulo frecuente y un estímulo infrecuente. Tres experimentos fueron conducidos, en los dos primeros la información en las dos modalidades fue redundante mientras que en el tercer experimento se evitó la presentación de información redundante. Información redundante se definió como la condición en donde un cambio de información se proporciona en las dos modalidades sensoriales. El objetivo del primer experimento fue determinar la contribución del estímulo auditivo y visual en la formación del potencial evocado bimodal. El estímulo auditivo se formó utilizando dos frecuencias, 1000 y 1500 Hz con una duración de 60 milisegundos a una velocidad de presentación de 1.3 segundos. El estímulo visual consistió de flechas apuntando a la izquierda y a la derecha con una duración de 50 milisegundos. Las señales se adquirieron en 5 lugares: Oz, Pz, Cz, Fz y Fpz teniendo como referencia la unión de las mastoides. La probabilidad de ocurrencia del estímulo infrecuente se estableció en 0.1 y la tarea del sujeto consistió en contar el número de estímulos infrecuentes en cada uno de los bloques. Se incluyeron siete condiciones de estimulación en cada una de las cuales el estímulo fue unimodal o bimodal. En el caso unimodal, el estímulo infrecuente generó un componente P300 de amplitud considerable. Para todos los sujetos la latencia del P300 visual fue mayor que la latencia del componente P300 auditivo. La latencia promedio del componente P300 auditivo fue de 360 milisegundos mientras que la latencia promedio del componente P300 visual fue de 500 milisegundos. Sin embargo, los dos componentes exhibieron distribuciones espaciales similares. Para ambas modalidades la mayor amplitud del

componente P300 fue registrada en el electrodo Pz, decrecentandose rápidamente hacia la parte posterior y de forma más lenta hacia la parte frontal. En la condición bimodal, cambiando un estímulo en una de las modalidades, el estímulo infrecuente evocó un componente P300 que es similar al componente P300 generado por el estímulo infrecuente presentado en forma aislada. Cuando el estímulo infrecuente ocurrió simultáneamente en las dos modalidades, el componente bimodal P300 es similar al P300 generado por el estímulo auditivo presentado en forma aislada. Los resultados sugieren, basados en la similitud de los componentes, que el estímulo visual infrecuente no contribuye a la formación del componente bimodal P300. Una interpretación de los datos del primer experimento es que la latencia del componente P300 refleja el tiempo al cual se realiza la decisión acerca del estímulo. Además, el grado de facilitación del RT bimodal depende de la similitud de los RTs unimodales. Squires indicó que en situaciones como la del primer experimento no se encontró interacción sensorial debido a la asincronía de las respuestas cognoscitivas auditiva y visual.

En el segundo experimento el objetivo fue variar la discriminabilidad intramodal para determinar si se revertía la predominancia del primer experimento y si la facilitación bimodal se reflejaba en el componente P300. El paradigma incluyó condiciones de estimulación auditiva y visual etiquetadas como "fáciles" y "difíciles". La tarea del sujeto consistió en contar el número de estímulos infrecuentes en cada uno de los bloques de intentos. En la situación de fácil discriminación las dos modalidades condujeron a RTs idénticos. En contraste, para discriminaciones difíciles los RTs fueron considerablemente mayores. Los estímulos bimodales "auditivo fácil"- "visual difícil" y "auditivo difícil"- "visual fácil" generaron RTs significativamente menores al mayor de los dos RTs unimodales y aproximadamente igual al menor de los RTs unimodales. Lo anterior, se cumplió tanto para los estímulos frecuentes como infrecuentes. Bajo estas condiciones no fue posible evocar interacciones

sensoriales debido a que el sujeto respondía al estímulo de fácil discriminabilidad. Cuando los RTs a ambos atributos de la combinación fueron similares, “auditivo fácil”-“visual fácil” y “auditivo difícil”-“visual difícil”, el RT bimodal fue más corto que cualquier de los RTs unimodales. En general, la relación entre las latencias de los componentes P300s en las diferentes condiciones coinciden con la información entre los diferentes RTs, es decir, latencias más cortas corresponden a RTs más rápidos. La excepción a los resultados anteriores es la condición “auditivo difícil” en donde el RT fue mayor en comparación con la condición “visual difícil”, mientras que las latencias P300 en las condiciones “auditivo difícil” y “visual difícil” fueron casi iguales.

Un tercer experimento se enfocó a determinar los efectos de información no redundante, con el propósito de entender la potencialidad del componente P300 en proporcionar información acerca de la interacción bimodal. Los paradigmas de “filtrado” se relacionan con la separabilidad o integrabilidad de las modalidades sensoriales. Una prueba de estas características proviene de procedimientos en los cuales la información proporcionada por las dos dimensiones es no redundante y la atención a ambas dimensiones podría interferir con el desempeño del sujeto. Si el sujeto no puede excluir la dimensión irrelevante las dimensiones son integrables, en cambio si no se encuentra interferencia las dimensiones son separables. Todos los estímulos bimodales se formaron con la condición fácil del segundo experimento, con la misma probabilidad de ocurrencia de la estimulación bimodal infrecuente. La tarea del sujeto fue contar una de las siguientes condiciones: (a) los tonos infrecuentes de 1100 Hz, (b) los flashes infrecuentes de color azul y (c) la combinación infrecuente de tonos de 1100 Hz con flashes de color azul. Con el propósito de aislar los efectos evocados por los estímulos infrecuentes se generó la diferencia entre el ERP bimodal a un estímulo infrecuente y el correspondiente ERP al mismo estímulo cuando es frecuente. La amplitud del componente bimodal

P300 en la condición infrecuente fue consistentemente mayor que cualquiera de los P300 infrecuentes unimodales, y no fue afectada por las condiciones de conteo. Las latencias de los P300s al estímulo bimodal infrecuente fue similar al estímulo "auditivo infrecuente" - "visual frecuente" y más corto que el estímulo "visual infrecuente" - "auditivo frecuente".

Observaciones

Los resultados de Squires revelan el hecho de que el componente P300 parece ser dominado por cualquiera de las modalidades que genere la decisión más rápida. Cuando las decisiones en las dos modalidades tienen aproximadamente las mismas latencias, el componente bimodal se genera más rápido que cualquiera de los P300 individuales. Un aspecto importante en el trabajo de Squires es el hecho de que las interacciones bimodales se evaluaron a partir del comportamiento de amplitud y latencias del componente P300. Sin embargo, es posible que los resultados de Squires puedan explicarse por el modelo de sumación o por el modelo de facilitación estadística en lugar de una verdadera interacción sensorial. En este sentido, es conveniente revisar el artículo de Gielen con el propósito de obtener un mejor entendimiento de uno de los modelos utilizados para explicar los diferentes aspectos cuando múltiples trayectorias sensoriales son estimuladas.

La investigación de Gielen considera dos experimentos en los cuales se examina el RT a un estímulo visual presentado en forma aislada y en combinación con un estímulo auditivo o un estímulo kinesthetic. En la presentación bisensorial, el estímulo visual se presentó primero por un tiempo de 50 ó 65 milisegundos [1]. En los párrafos siguientes se discute únicamente el primer experimento. Trabajos previos en el campo de interacciones sensoriales establecen que el RT a la combinación de

estímulos fue de 20 a 40 milisegundos más corto que el RT correspondiente al estímulo visual presentado en forma aislada. Este resultado se ha interpretado como evidencia de la interacción entre las dos vías sensoriales. Sin embargo, hay que considerar que la hipótesis de Raab, mencionada en la referencia [1], asume que el sujeto responde a la modalidad cuyo procesamiento se termina primero, es decir, cumple con el modelo de facilitación estadística.

Con el propósito de explicar la generación de RTs más rápidos, Gielen modificó el modelo de Raab incorporando la distribución de los RTs en lugar de la distribución de los tiempos de llegada. Se ha reportado que el RT a un estímulo visual relevante es del orden de los 20 a los 80 milisegundos más corto si se presenta en forma simultánea o con un retraso de 100 milisegundos con respecto de un estímulo auditivo accesorio. Cuando tales efectos se encuentran, se asume que las vías visual y auditiva interactúan de alguna forma para acelerar el RT. Varias hipótesis intentaron explicar estos resultados. La hipótesis más sencilla es que el RT es determinado por el RT unimodal más rápido. Sin embargo, la evidencia parece contradecir la hipótesis debido a que el RT al estímulo bimodal fue más corto que el RT para el estímulo accesorio presentado en forma aislada más el retraso entre el estímulo relevante y accesorio. Nickerson y Rabb argumentaron que puede existir una clase de facilitación estadística debido a la variabilidad en los "tiempos de arribo" de los resultados del procesamiento en las dos modalidades. En el modelo de Rabb no se asume ninguna interacción entre modalidades sensoriales, la facilitación del RT se basa en asumir que el sujeto utiliza la modalidad que proporciona la indicación más temprana de que el estímulo se ha presentado. El modelo de Raab se basa en la siguiente lógica: debido a que el sujeto responde a la información de la modalidad que llega primero, entonces, el RT bisensorial se basa en las distribuciones de los tiempos de arribo unimodales. Si dos estímulos en dos modalidades S y L tienen distribuciones de arribo $S(t)$ y $L(t)$, la distribución

del mínimo, $F(t)$, se calcula como sigue:

$$F(t) = S(t) \int_t^{\infty} L(t) d(t) + L(t) \int_t^{\infty} S(t) d(t).$$

Cuando $S(t)$ y $L(t)$ no se traslapan demasiado, el promedio de la distribución de $F(t)$ es igual al de $S(t)$, y por lo tanto no existe **facilitación estadística**. Sin embargo, cuando las dos distribuciones se traslapan más, el promedio de $F(t)$ es menor, cuando las dos distribuciones se traslapan completamente el promedio de $F(t)$ es el menor y ocurre la **máxima facilitación estadística**. El modelo de Raab asume que las distribuciones de los tiempos de arribo para las vías sensoriales visual y auditiva son normalmente distribuidas y de igual **varianza**, figura II.1.

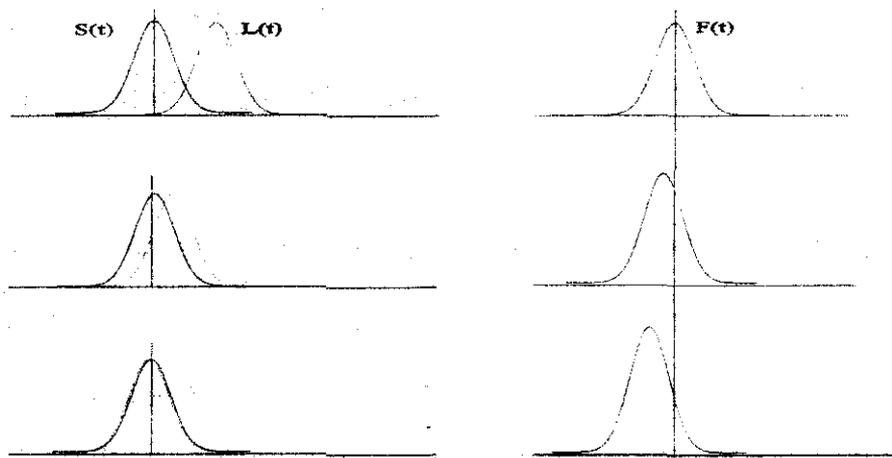


Figura II.1. Modelo de Facilitación Estadística de Raab. La distribución $F(t)$ se recorre hacia la izquierda conforme aumenta el traslape de las distribuciones $S(t)$ y $L(t)$.

Nickerson ha argumentado que el diseño de paradigmas con estímulos prueba, en donde el estímulo accesorio se presenta ocasionalmente y en forma aislada, se prefieren debido a que

supuestamente eliminan la posibilidad de facilitación estadística [22]. La razón es que el sujeto debe responder únicamente al estímulo relevante y no al accesorio. Nickerson argumentó que la respuesta a un estímulo relevante es acelerada, en alguna forma, por la presencia de un estímulo accesorio. Sin embargo, la utilización de paradigmas con estímulos prueba podría no ser garantía de que pueda ocurrir facilitación estadística.

Para proporcionar un estimado de los efectos del fenómeno intersensorial, los RTs bisensoriales teóricos basados en la distribución $F(t)$ se compararon con los RTs obtenidos en las condiciones bisensoriales presentadas. Los resultados mostraron que los RTs para la combinación de un estímulo relevante y un accesorio fueron más cortos que los RTs estimados utilizando facilitación estadística, con diferencias de 5.5 a 23 milisegundos.

Observaciones

Los resultados de Gielen sugirieron que los procesos evocados no pueden explicarse por un modelo estadístico. Nickerson sugirió dos posibles modelos para explicar los efectos de estímulos accesorios. Una explicación es la hipótesis de la suma de energías que establece que la energía del estímulo accesorio se combina en alguna forma con la energía del estímulo relevante, conduciendo a un procesamiento más rápido en etapas tempranas y a tiempos de arribo más cortos. Sin embargo, Nickerson presentó una segunda hipótesis en la que argumenta que el estímulo accesorio prepara las etapas últimas del procesamiento con el propósito de generar una respuesta.

Un buen ejemplo de la aplicación clínica del fenómeno de facilitación son los trabajos de Shipley y Michel P. Lynch [2, 23-25]. Shipley estudió la interacción audiovisual en niños con retraso

mental analizando los ERPs auditivos, visuales y audiovisuales [23]. Shipley encontró que las respuestas bimodales son de más baja amplitud de lo que predice la sumación lineal de las actividades unimodales. Shipley también demostró una disminución de amplitud hasta del 50 % en los componentes P200 auditivo, visual y audiovisual al segundo de dos estímulos sucesivos. Shipley encontró que las actividades evocadas en el rango de 60 a 80 milisegundos no presentan atenuación alguna [24]. En el estudio de integración sensorial en niños, Shipley encontró que para niños disléxicos la respuesta intersensorial fue simplemente la suma de las actividades unimodales o un decremento en la respuesta intersensorial, como en el caso de niños con retraso mental [2]. Lo anterior se interpretó como que en dislexia no existe facilitación, entendiéndose por facilitación "la relación de la máxima amplitud de la respuesta bimodal a la diferencia entre ésta y el máximo de la suma de las respuestas unimodales".

Michel P. Lynch estudió el seguimiento narrativo multisensorial en un sujeto con sordera profunda utilizando codificación electrocutánea y una ayuda vibrotáctil [25]. El sujeto recibió 41 horas de entrenamiento de reconocimiento de voz mediante vía somatosensorial en un estudio previo y se le evaluó al seguir un discurso continuo. Esta evaluación fue conducida en tres fases. En la primera fase, el sujeto utilizó el codificador para seguir una narración en tres condiciones: (a) lectura de labios y ayuda auditiva (L+H), (b) lectura de labios y codificador de tacto (L+TV) y (c) lectura de labios, decodificador de tacto y ayuda auditiva (L+TV+H). El resultado mostró que el desempeño del sujeto fue significativamente mejor en la condición L+TV+H que en la condición L+H, sugiriendo que el sujeto se beneficia de la información adicional proporcionada por el codificador de tacto. En la segunda fase, la ayuda vibrotáctil se utilizó en tres condiciones: (a) lectura de labios (L), (b) lectura

de labios y ayuda táctil (L+TA) y (c) lectura de labios, ayuda táctil y ayuda auditiva (L+TA+H). El sujeto fue capaz de combinar información de la ayuda vibrotáctil con aquella de la lectura de labios y de la ayuda auditiva. En la tercera fase, ambos dispositivos táctiles se utilizaron en seis condiciones: (a) lectura de labios (L), (b) lectura de labios y ayuda auditiva (L+H), (c) lectura de labios y ayuda vibrotáctil (L+TA), (d) lectura de labios y codificador táctil (L+TV), (e) lectura de labios, ayuda vibrotáctil y ayuda auditiva (L+TA+H) y (f) lectura de labios, codificador táctil y ayuda auditiva (L+TV+H). Los resultados de Michel P. Lynch mostraron que el dispositivo vibrotáctil mejora de manera importante el desempeño del sujeto en comparación con el obtenido con la lectura de los labios y la ayuda auditiva.

Observaciones

Los experimentos de Michael P. Lynch incluyeron el estudio de las relaciones entre las trayectorias auditiva, visual y somatosensorial. Sin embargo, el análisis se realizó obteniendo el número de palabras que el sujeto puede reconocer en cierto intervalo de tiempo. Los resultados mostraron que los sujetos reciben beneficios cuando una fuente suplementaria es utilizada para presentar información de voz.

J.L. Kenemans estudió los ERPs obtenidos con la unión de los atributos frecuencia espacial y orientación como una función de los parámetros del estímulo y requerimientos de la respuesta [10]. Los ERPs se registraron en sujetos que oprimían un botón en respuesta a la presentación del estímulo bisensorial relevante, definido por frecuencia espacial-orientación, e ignorando otra condición de estimulación. El trabajo de Kenemans se basó en el hecho de que diferentes niveles de un atributo

visual pueden generar diferentes respuestas cerebrales que se manifiestan en el ERP y que son determinadas exclusivamente por el significado diferencial de los niveles para efectuar un funcionamiento adecuado. Por ejemplo, cuando un sujeto es instruido para generar una respuesta a un estímulo de un color (estímulo relevante) e ignorar otros colores (estímulos irrelevantes), entonces el estímulo relevante puede generar un ERP que difiere en ciertos aspectos del evocado por el color que se ignora. La respuesta diferencial debe no ser sensible a la selección de que color es relevante o irrelevante, es decir, el color rojo y el azul deben generar ERPs similares cuando se seleccionan como estímulos relevantes. Mas aún, la respuesta diferencial debe de ser insensible a si la respuesta conductal se realiza o no. Kenemas concluyó que los ERPs asociados con la selección de frecuencia y orientación son altamente comparables a los asociados con otros atributos visuales, por ejemplo el color, y que la selección de múltiples atributos visuales puede ser jerárquica en un nivel de procesamiento e independiente en otro.

En estudios semánticos, el contexto es manipulado por la presencia o ausencia de una palabra relacionada semánticamente o por un fragmento de una oración que predice o se ajusta con la palabra relevante. Sin embargo, se ha puesto poco énfasis en determinar la existencia de procesos comunes del lenguaje en las modalidades auditiva y visual. Parece ser que con información escrita y hablada después de procesos específicos en las diferentes modalidades, en algún punto deben de emplearse un conjunto de procesos compartidos. Holcomb y colaboradores se enfocaron a estudiar la evolución temporal de medidas conductuales y electrofisiológicas originadas por ayuda de tipo semántico entre las trayectorias visual y auditiva [26]. Evidencias electrofisiológicas se basaron en la presencia y en la latencia del componente N400 de los ERPs.

Holcomb y colaboradores estudiaron los efectos de ayuda semántica en las modalidades visuales o auditivas [27]. En ambas modalidades encontraron diferencias en la amplitud de la N400 cuando una palabra relevante fue precedida por una palabra de ayuda semánticamente relacionada. También se mostró que el efecto se inició tempranamente (200 en lugar de 300 milisegundos) y se prolongó (800 en lugar de 600 milisegundos) para palabras habladas que para palabras escritas. Los resultados se interpretaron en el sentido de que el reconocimiento de palabras habladas puede ocurrir en línea, antes del arribo de toda la información acústica relacionada con la palabra. En un segundo estudio, Holcomb y Neville asociaron el efecto del adelanto del componente auditivo N400 a la influencia de la prosodia e indicios articulatorios que están presentes en un discurso natural. Los resultados anteriores son soportados por la hipótesis de que diferentes mecanismos subyacen en la información semántica para palabras habladas y escritas. Existen al menos tres posibilidades para explicar los efectos de ayuda semántica entre las modalidades. Las dos primeras, referidas como hipótesis de conversión, establecen que las palabras se convierten de una modalidad a otra durante la lectura y posiblemente durante el proceso de escucharlas. De esta forma, la ayuda semántica entre modalidades debería producir un patrón diferente de efectos que dentro de la modalidad que representa la ayuda semántica. La tercera posibilidad considera que las palabras escritas y habladas se procesan en su propio sistema léxico y perceptual, activando la interpretación del significado en un sistema común semántico o perceptual. En el experimento de Holcomb y Neville la predicción fue que, si una ayuda semántica entre modalidades resulta de un proceso de conversión, entonces debería existir evidencia de un efecto sobre la N400 bimodal en intervalos largos entre el estímulo target y el estímulo que representa la ayuda semántica. En contraste, debe existir poco efecto en intervalos cortos. Sin embargo, si una ayuda semántica entre modalidades resulta de la actividad en un sistema

semántico común, entonces debería existir evidencia de un efecto sobre la N400 bimodal en intervalos cortos y largos. En el primer experimento, la palabra de ayuda semántica se presentó en la modalidad visual y la palabra relevante se presentó en forma auditiva. El propósito de este experimento fue determinar si los mismos mecanismos que se generan por ayuda semántica dentro de la modalidad auditiva también se generan por ayuda semántica entre palabras auditivas y visuales. Una tercera parte de los estímulos relevantes fueron pseudo-palabras, la mitad de las palabras relevantes fueron semánticamente relacionadas a la palabra de ayuda semántica. Los intervalos entre el estímulo de ayuda y el relevante "Stimuli Onset Asynchrony (SOA)" fueron de 800 milisegundos (largo), 200 milisegundos (corto) y presentación simultánea. La tarea fue responder al estímulo relevante. A cada uno de los sujetos se les presentó un total de 360 estímulos bimodales con igual proporción de estímulos semánticamente relacionados, no-relacionados y palabras-pseudopalabras. El promedio de duración del estímulo auditivo fue 568 milisegundos, el rango fue de 300 a 862 milisegundos. En las diferentes condiciones de SOA, se generó una respuesta más rápida a estímulos relevantes correlacionados que a estímulos relevantes no correlacionados. Los tiempos de reacción para un SOA de 0 milisegundos fueron ligeramente mayores que para otras condiciones de SOA. La interacción entre SOA y estímulos relevantes fue significativa, indicando que el efecto de ayuda semántica tiende a ser ligeramente mayor conforme el SOA se incrementa. Las formas de onda de los ERPs dependen del traslape entre las respuesta al estímulo de ayuda visual y la respuesta al estímulo relevante auditivo.

Observaciones

Los autores asumieron que el ERP relevante correspondió a la suma de la actividades

generadas por el estímulo relevante y la evocada por el estímulo de ayuda semántica. Sin embargo, es posible que exista una interacción más compleja entre las modalidades sensoriales incluidas en el experimento. El hecho de que el estímulo visual fue capaz de “ayudar” a los estímulos relevantes auditivos, en condiciones de SOA de 0 y 200 milisegundos, es más consistente con la hipótesis de que las dos modalidades comparten procesos semánticos comunes.

II.3. Discusión

En este capítulo se presentaron los trabajos más relevantes en el estudio del fenómeno intersensorial. Las investigaciones inicialmente se basaron en el análisis de información conductual representada por el tiempo de reacción. Los resultados indican que no es suficiente la medida conductual para explicar los fenómenos que subyacen al manipular atributos de un estímulo en una vía sensorial o al utilizar estimulación multisensorial. Recientemente se ha desarrollado un interés por el estudio de la interacción sensorial utilizando la información reflejada en los potenciales evocados. En este sentido, Hillyard y colaboradores han realizado aportaciones relevantes. Por ejemplo, Hillyard & Munte [28] estudiaron la vía sensorial visual manipulando el color y la localización espacial de barras. Una de sus principales contribuciones fue proponer un esquema para inferir acerca de la interdependencia en el proceso de selección de diferentes atributos del estímulo.

En la presentación de los diferentes trabajos de investigación se hace énfasis en la descripción de los paradigmas así como en la terminología utilizada en este campo. Las experiencias en el diseño de paradigmas permite fundamentar el diseño de los seis paradigmas utilizados en la presente investigación, además de establecer un lenguaje común.

Es importante señalar que el análisis del fenómeno intersensorial permanece vigente en

nuestros días [29], por esta razón se mencionan trabajos relacionados con posibles aplicaciones clínicas. Sin embargo, es importante recordar que el objetivo de la presente investigación está relacionado con encontrar evidencia de relaciones intersensoriales sin enfocarse en una aplicación clínica específica.

POTENCIALES EVOCADOS UNIMODALES Y MULTISENSORIALES

III.1. Introducción

Los mecanismos de procesamiento de información durante el desarrollo de una tarea se han analizado utilizando Potenciales Evocados Relacionados (ERPs), los cuales son pequeñas fluctuaciones generadas en el tejido neuronal y obtenidas mediante la promediación de señales adquiridas en forma sincronizada con la presentación del estímulo. Los ERPs representan una técnica no invasiva para el registro de patrones relacionados con la dinámica de la actividad neuronal y han permitido estudiar procesos cognoscitivos con una precisión que no puede lograrse con técnicas de comportamiento [6]. Los ERPs han representado una ayuda para separar los procesos de evaluación de los estímulos de aquellos procesos relacionados con la respuesta motora del sujeto, identificando niveles jerárquicos de selección de estímulos y distinguiendo procesos seriales y en paralelo [30].

En los primeros estudios, se consideró que los ERPs representaban un fenómeno unitario, actualmente es bien conocido que los potenciales evocados están formados por varios componentes y que dependiendo del paradigma utilizado es posible que exista un traslape entre ellos [30]. Los diferentes componentes, generalmente clasificados como componentes exógenos y endógenos, pueden reconocerse por su distribución espacial y por manipulaciones experimentales de los diferentes atributos de los estímulos [12]. Los componentes exógenos dependen directamente de las características físicas de los estímulos y se acepta que reflejan eventos que se originan en el exterior del sistema nervioso central [31]. La medición de las latencias de los componentes exógenos se ha convertido en una herramienta diagnóstica para enfermedades neuronales que afectan la integridad

de las diferentes vías sensoriales. En contraste, se asume que los componentes endógenos se generan por los procesos psicológicos, es decir, sus amplitudes y latencias son determinadas por los procesos cognoscitivos originados por la tarea experimental que se le asigna al sujeto. Algunos de los componentes endógenos parecen particularmente útiles para evaluar factores relacionados con la pérdida de atención selectiva, como en el caso de hiperactividad o esquizofrenia [32]. La presente investigación se relaciona con el estudio de los componentes exógenos y endógenos generados por la estimulación de las vías sensoriales auditiva y visual, en forma aislada o simultánea, en donde el grado de dificultad de la tarea asignada al sujeto se le considera una variable.

En el presente trabajo, se establece una diferenciación en el dominio del tiempo entre componente y onda en un potencial evocado. Un componente se asume que se origina a partir de un generador cerebral, mientras que una onda es una medida que describe la morfología de un potencial evocado. En consecuencia, es importante evitar definir un nuevo componente cuando la onda obtenida difiere ligeramente de ondas similares observadas en otros estudios. Los criterios utilizados en la definición de un componente son: (a) polaridad, (b) latencia, (c) distribución espacial, y (d) secuencia temporal. Utilizando los criterios anteriores se han identificado componentes para los potenciales evocados visuales y auditivos. En las siguientes secciones se describen los componentes exógenos y endógenos visuales y auditivos y su posible asociación con diferentes etapas de procesamiento de información.

III.2 Componentes del Potencial Evocado Auditivo

El potencial evocado auditivo (AEP) es caracterizado por: (a) respuestas de tallo cerebral,

ondas I-VII, dentro de los primeros 8 milisegundos después de la presentación del estímulo, (b) respuestas de latencia media (No, Po, Na, Pa, Nb) entre los 8 y los 50 milisegundos, (c) componentes P1, N1, P2 en los 50 a los 150 milisegundos y (d) componentes endógenos N2, P300, N400, Nd, MMN, NA y "Slow Wave" que pueden aparecer desde los 100 milisegundos [9, 31]. Algunos componentes se encuentran directamente en la morfología del potencial evocado mientras que otros como el componente Nd ("Processing Negativity") y el componente MMN ("Mismatch Negativity") se obtienen cuando se restan actividades eléctricas obtenidas en las diferentes condiciones de un experimento.

Un punto importante es el análisis de los efectos del paradigma sobre los componentes de los potenciales evocados debido a la asociación de los componentes con los diferentes mecanismos del procesamiento de la información. En los siguientes párrafos se discuten aspectos relacionados con cambios de amplitud, cambios temporales y la distribución espacial de los componentes exógenos y endógenos del potencial evocado auditivo.

Los paradigmas que incluyen la presentación de estímulos relevantes y estímulos irrelevantes, llamados paradigmas de atención selectiva, no han proporcionado en forma consistente evidencia de cambio en las respuestas de tallo cerebral y los componentes de latencia media. El componente N1 se ha reportado como un índice de la cantidad de información recibida por la vía sensorial [31]. La amplitud del componente N1 no parece correlacionarse con algún aspecto cualitativo de percepción y se limita a señalar la detección del estímulo [33]. En otras palabras, este componente parece indicar que algún estímulo está ocurriendo sin especificar sus características. El componente N1 ha sido

considerado como un marcador de lectura inicial de información o como un componente que refleja la formación del trazo de memoria del estímulo. El componente N1 presenta una distribución amplia que es máxima en el vertex. En estudios que involucran aspectos de atención, Hillyard y colaboradores encontraron un aumento del componente N1, llamado componente Nd, el cual fue inicialmente asociado con un incremento en la actividad del generador neuronal. Naatanen interpretó este efecto como la superposición de un componente endógeno originado por una fuente neuronal diferente, proceso llamado "Processing Negativity" [33]. El componente Nd se obtiene restando el potencial evocado por el estímulo relevante del potencial evocado originado por el mismo estímulo cuando es irrelevante y presenta una distribución fronto-central.

El componente P200, que se origina alrededor de los 175 milisegundos, tiene una amplitud mayor a lo largo de la línea media y cerca del vertex. A pesar de comportarse en forma similar al componente N1 en varias dimensiones del estímulo, el componente P2 puede ser totalmente independiente [12]. Novak y colaboradores reportaron que en los potenciales evocados para tonos frecuentes, en paradigmas de discriminación de tonos, la latencia del componente P2 se retrasa mientras que su amplitud se modifica de acuerdo a la duración del estímulo relevante [34].

El componente N200 se ha asociado con el proceso de evaluación del estímulo [31, 35]. Se ha sugerido que el proceso discriminativo indexado por el componente N200 origina la generación del componente P300, el cual refleja la siguiente fase de actualización de la memoria o el proceso de cierre de la decisión. Kramer y colaboradores reportaron que el componente N200 es mayor cuando los estímulos que se presentan son diferentes a los esperados por el sujeto ("Mismatches") en

comparación con la situación de presentación de estímulos que espera el sujeto (“Matches”), sugiriendo que el componente N200 es sensible al grado de “Mismatch” entre estímulos e independiente de la estructura de la tarea [36]. Estos hallazgos concuerdan con resultados previos en los que el componente N200, en procesos de detección de “Mismatch”, no difiere en tareas automáticas o no automáticas [36]. Recientemente, diferentes estudios han demostrado que el componente N200 consiste de dos picos llamados onda N2a, “Mismatch Negativity” (MMN), y onda N2b (N2 ó N200). La MMN es generada por cualquier cambio discriminable de un sonido repetitivo, en forma independiente a los procesos de atención, proporcionando una medida objetiva de la habilidad de discriminación de estímulos complejos que se le presentan al sujeto [37]. La MMN se observa mejor restando el potencial evocado generado por un estímulo repetitivo (un estímulo estándar) del potencial evocado producido por un estímulo menos frecuente y que dependiendo de la magnitud del estímulo menos frecuente se genera entre los 100 y los 200 milisegundos después de la presentación de los estímulos. El hecho de que el grado de dificultad de la tarea afecte las latencias de la MMN, N2 y el componente P300, sin incrementar la duración de la MMN, sugiere que la MMN se relaciona con la salida de un proceso automático de detección de “Mismatch” en lugar de un proceso de “Mismatch” [34, 37]. La MMN podría ser generada por un proceso de “mismatch” causado por una entrada que se desvía del trazo de memoria establecido. El concepto de trazo de memoria establece que las características del estímulo son rápidamente mapeadas en sistemas neuronales de memoria sensorial, es decir, se genera una representación neuronal de las características físicas del estímulo [37]. En paradigmas que incluyen aspectos de discriminación de estímulos se ha reportado que la MMN puede dar inicio al proceso de reconocimiento del estímulo relevante, indexado por N2-P300 [38]. La fuerte asociación del componente N2 con el tiempo de reacción

apoya la idea de que el componente N2 podría estar asociado con una etapa de procesamiento de información relacionada con la identificación, evaluación y reconocimiento de un estímulo como estímulo relevante. Novak y colaboradores han establecido la diferencia de la distribución espacial entre estos dos componentes: la distribución espacial de la MMN consiste de una negatividad fronto-central y una positividad posterior-lateral, mientras que el componente N2 muestra su amplitud máxima en el vertex sin inversión de polaridad posterior-temporal [34-38].

Además, se ha descrito un componente negativo llamado NA, el cual es generado tanto por tonos frecuentes e infrecuentes, reflejando el procesamiento adicional requerido en un paradigma de discriminación de tonos [38]. El componente NA es obtenido restando los potenciales evocados generados en un paradigma de tiempo de reacción, el sujeto tiene la tarea de responder cada vez que se presenta el estímulo, de los potenciales evocados generados por el mismo estímulo cuando es no relevante en un paradigma de discriminación de estímulos. Las latencias de los componentes MMN, N2 y P300 pueden manipularse sin afectar el tiempo de ocurrencia del componente NA. El componente NA se traslapa con la actividad N1-P2, pero puede identificarse por su distribución fronto-central.

El papel del componente P300 en los mecanismos de procesamiento de información no se ha definido completamente. Este componente exhibe un voltaje positivo máximo sobre las regiones parietales del cerebro. El componente P300 se genera bajo ciertas condiciones experimentales, en forma independiente de la vía sensorial que se estimula [12]. Hasta la fecha, numerosos estudios han demostrado que el componente P300 es generado ya sea durante una etapa de selección de respuesta

o al final de la evaluación del estímulo [5], también el componente se ha relacionado con el proceso de cierre de decisión. La latencia del componente P300 depende de la tarea de evaluación del estímulo, es decir, el incrementar la complejidad de la tarea se refleja en una latencia mayor del componente P300. Además, existe evidencia de que un estímulo no relevante puede generar un componente P300. Parece ser que la latencia del componente P300 proporciona información concerniente a la temporización mental del procesamiento de información, mientras que su amplitud es sensible a cambios en la demanda de recursos neuronales [36]. En decisiones correctas la amplitud del componente P300 se incrementa cuando las decisiones se realizan con mayor exactitud o con criterios estrictos en la toma de la decisión. Además, el rechazo correcto de estímulos irrelevantes genera un componente P300 siempre y cuando los estímulos se presenten con baja probabilidad de ocurrencia [31]. Los hallazgos indican que tipos equivalentes de decisiones se asocian con componentes endógenos equivalentes, sin importar las características físicas de los estímulos. Actualmente, los papeles más aceptados del componente P300 son “el cierre de la época cognoscitiva” por Desmedt, el concepto de “actualización” desarrollado por Donchin y el concepto de “expectancia” propuesto por Squires [12].

Se ha reportado una baja correlación entre la latencia del componente P300 y el tiempo de reacción en situaciones de toma de decisiones difíciles y respuestas rápidas, mientras que se encontrado una alta correlación en situaciones en donde al sujeto se le enfatiza que es importante la exactitud de su respuesta. En otros estudios, se ha propuesto que la latencia del componente P300 y el tiempo de reacción son índices de la temporización de diferentes etapas de procesamiento, mientras que el RT incluye los procesos relacionados con la toma de decisiones y respuestas conductuales, la latencia del componente P300 es una medida de la duración del proceso de

evaluación del estímulo (decodificación, reconocimiento y clasificación), independiente de la selección de la respuesta y de su ejecución [31].

En paradigmas semánticos, Kutas y colaboradores así como Hillyard y colaboradores han reportado que los ERPs relacionados con palabras sin sentido originan una negatividad centro-parietal entre los 300 y los 600 milisegundos después de la presentación del estímulo, negatividad llamada componente N400 [31, 39]. Los autores proponen que el componente N400 posiblemente es un indicio electrofisiológico de la interrupción del procesamiento de información, debido a la incongruencia semántica, y el intento de reinterpretar la información. A diferencia del componente P300, el componente N400 es relativamente insensible a la manipulación de la probabilidad de ocurrencia de incongruencias semánticas y muestra una ligera pero consistente lateralización derecha.

III.3. Componentes del Potencial Evocado Visual

En varios experimentos, con el propósito de establecer las posibles etapas del procesamiento de información se han manipulado diferentes atributos del estímulo visual, el análisis se ha realizado en base a cambios de amplitud y latencia de los componentes exógenos y endógenos. En un paradigma típico de discriminación visual se generan los componentes exógenos N75, P1 (80-120 milisegundos), N1 (150-190 milisegundos) y P200 (200-250 milisegundos) y los componentes endógenos N2a (200-250 milisegundos), N2b (250-290 milisegundos), P300a con un inicio alrededor de los 290 milisegundos y P300b alrededor de los 375 milisegundos [31, 32]. En los siguientes párrafos se menciona un resumen de la asociación entre los componentes exógenos y endógenos de los potenciales evocados y las diferentes etapas del procesamiento de la información.

En paradigmas de atención espacial, algunos atributos del estímulo visual afectan los componentes exógenos. En la posición relevante, el estímulo de flash genera un aumento de los componentes P100, N170 y P220 en la parte posterior del cerebro, además del aumento del componente N160 en la región fronto-central. Hillyard y colaboradores consideran que los efectos de atención espacial están relacionados con una modulación de los picos que difieren en morfología y latencia, sin embargo, no existe consenso de los efectos de la atención selectiva sobre estos componentes [31]. En contraste, en paradigmas de selección de color una onda negativa endógena centro-parietal se genera entre los 150 y los 300 milisegundos. En estos paradigmas se ha observado que los componentes del potencial evocado y efectos de atención son independientes del color que se utilice [28]. En general, el componente P200 es frecuentemente asociado con atributos físicos del estímulo, sin embargo, su distribución espacial no depende fuertemente de la modalidad que se estimula.

Los componentes endógenos juegan un papel importante en los modelos cronométricos que se han propuesto para las diferentes etapas de procesamiento cognoscitivo. Una onda negativa alrededor de los 200 milisegundos (N2 ó N200) se ha reportado en paradigmas que incluyen la presentación de estímulos visuales infrecuentes. En diferentes estudios, se ha observado que la amplitud del componente N200 está inversamente relacionada con la frecuencia del estímulo infrecuente. Renault en paradigmas visuales, involucrando el tiempo de reacción, ha distinguido dos tipos de ondas N200 [40]. Una dependiente de la modalidad sensorial (N2a) y otra (N2b) que es afectada por factores relacionados con la tarea asignada al sujeto. La onda N2a es llamada "Mismatch Negativity" y es generada por estímulos relevantes o infrecuentes y sus efectos son mejor analizados

restando el ERP del estímulo frecuente del ERP del estímulo infrecuente. Este componente es considerado como un marcador de un desacoplamiento neuronal debido a que es afectado por la probabilidad de ocurrencia y la magnitud del estímulo infrecuente [41]. En contraste, la onda N2b (N2) es independiente de la modalidad con una distribución fronto-central y es afectada por factores endógenos tales como la atención y se correlaciona con el tiempo de reacción. Debido a la secuencia temporal de las ondas N2a y N2b y su dependencia con factores exógenos o endógenos, se ha propuesto un modelo de procesamiento de información. El modelo considera que la onda N2a esta relacionada con el proceso automático de extracción de características del estímulo mientras que la evaluación de la significancia del estímulo y la selección de la respuesta se asocian con la onda N2b.

El componente P300 se divide en las ondas P300a y P300b (P300). La onda P300a tiene una distribución espacial similar a la onda N2b mientras que la onda P300b se genera por el estímulo relevante. La evaluación del estímulo y la expectación subsecuente, posiblemente indexado por N2b, son dos procesos reflejados por la onda P3b.

III.4. Modelo Cronométrico del Potential Evocado Unimodal

Es posible inferir la probable relación entre los componentes del ERP y los procesos mentales que se generan en diferentes condiciones experimentales. Basados en el inicio, latencia de la máxima amplitud y cambios de duración de los componentes del ERP, de acuerdo a variables impuestas por la tarea, se puede estimar la temporización de las etapas de procesamiento de información. Por ejemplo, manipulando las variables del paradigma tales como la degradación de los estímulos se puede influir un proceso de información en particular. En una serie de experimentos Ritter y colaboradores

determinaron cambios en los componentes del ERP manipulando dos variables, la degradación del estímulo y el tipo de respuesta. La primera variable fue asociada con el proceso de información de la decodificación del estímulo, mientras que la segunda se asoció con el proceso de clasificación del estímulo. Los resultados indicaron que los componentes endógenos, NA y N2b, reflejan dos diferentes etapas de información que además son secuenciales. Considerando la información presentada en las secciones anteriores, la presente sección se dedica a describir la posible asociación de los componentes del potencial evocado con las diferentes etapas del procesamiento de información.

Las diferentes etapas de información en un paradigma de discriminación de estímulos podría comenzar con la lectura inicial de los analizadores sensoriales y una decodificación de las características del estímulo. Estas etapas se han asociado con componentes de latencia media, los componentes exógenos P1 y N1, que continúan hasta el componente P2. Parece ser que durante estas etapas se lleva a efecto la formación del trazo de memoria, es decir, se forma el mapeo del estímulo en el sistema neuronal. En esta etapa ocurre tanto procesamiento paralelo, salidas de diferentes sistemas aferentes, así como la integración temporal secuencial de información sensorial [37]. Si la tarea incluye la presencia de estímulos desviantes, aparece en este rango de latencias la "Mismatch Negativity" (MMN). La MMN se ha asociado con un análisis automático del estímulo, es decir, un proceso de acoplamiento automático con el trazo de memoria, que es un proceso independiente de la atención. La MMN juega un papel de un disparador de atención involuntaria para desarrollar más tarde un análisis consciente del estímulo [34]. Por otra parte, si la tarea requiere la selección de un estímulo, el componente Nd puede aparecer en este rango de latencias, figura III.1.

Otro componente que traslapa temporalmente a la actividad exógena N1-P2 es el componente NA, representando procesamiento sensorial adicional en la etapa del proceso de decodificación del estímulo [38]. En consecuencia, el proceso de decodificación se traslapa con la modulación de los componentes exógenos debido a cambios en la atención, procesamiento sensorial adicional para propósitos de discriminación del estímulo o proceso de acoplamiento reflejado por los componentes Nd, NA y MMN.

La iniciación del análisis consciente del estímulo, dado por la MMN junto con la información del estímulo proporcionada por la actividad N1-P2, permite desarrollar la etapa de categorización del estímulo, el cual es indexado por el componente N2. La dificultad en el proceso de categorización afecta la latencia del componente N2. Si el estímulo es relevante la onda P300b se presenta posteriormente de la actividad N2-P3a, indexando el cierre del proceso cognoscitivo, la actualización del trazo de memoria interno o la expectativa del estímulo [42]. El modelo cronométrico que es posible asumir en el análisis del procesamiento de información sensorial, vía la actividad eléctrica

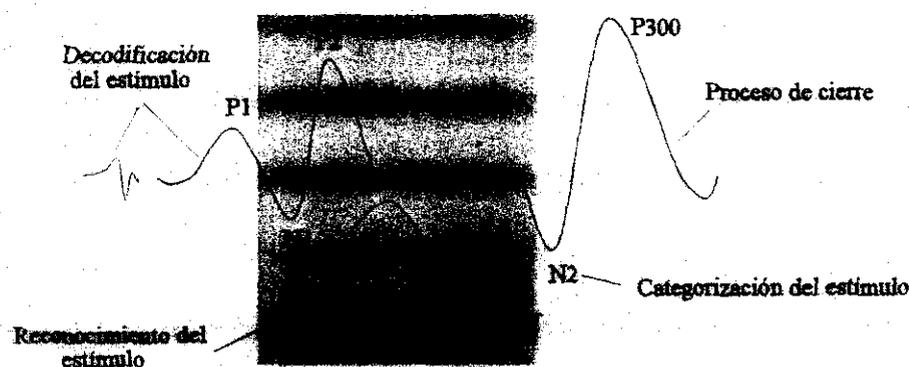


Figura III.1. Modelo cronométrico de las diferentes etapas de procesamiento de la información. El área sombreada indica traslapeamiento de procesos cognoscitivos relacionados con el reconocimiento de estímulos. En la figura, de izquierda a derecha se muestra la evolución temporal de los procesos de información.

reflejada en los potenciales evocados, se muestra en la figura III.1. El diagrama a bloques de un posible modelo es incluido en la figura III.2.

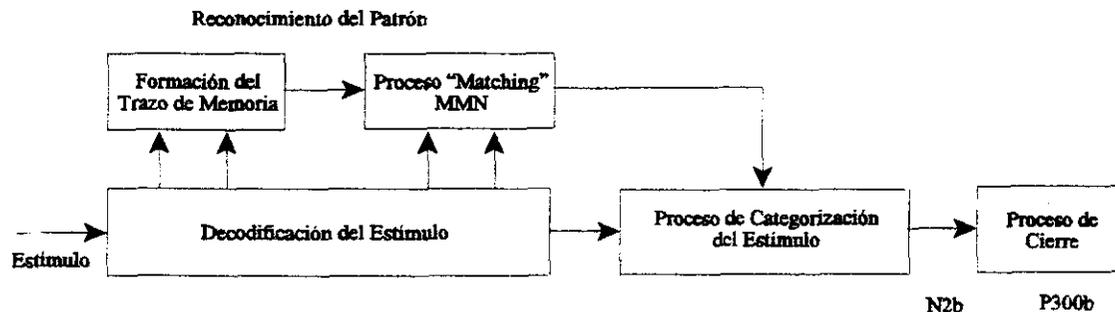


Figura III.2. Modelo cronométrico para las etapas de procesamiento de la información en paradigmas de discriminación de estímulos.

Sin embargo, a pesar de los modelos cronométricos propuestos, la relación entre la latencia de un componente específico y eventos asociados con un proceso mental aún no se encuentra bien definida. Es común asumir que las latencias de las amplitudes pico del ERP se relacionan temporalmente con la terminación de un evento mental en particular. Sin embargo, es posible que la terminación del evento este marcado por el inicio o por cualquier otro punto del componente del ERP. La relación no específica entre la latencia del componente y la terminación del evento mental es un punto a considerar en cualquier intento por analizar procesos mentales reflejados en los potenciales evocados, ya que puede existir traslape de componentes.

III.5. Potenciales Evocados en el Análisis de Información Intrasensorial e Intersensorial

El fenómeno de interacción sensorial se ha evidenciado por tiempos de reacción (RT) más cortos para la detección de un estímulo en una modalidad cuando es precedido o presentado

simultáneamente por otro estímulo en otra modalidad. Hershenson, apoyado por Gielen y colaboradores, encontraron que en presentaciones visual-auditivas el RT es más rápido que el esperado por estimulación visual o auditiva en forma aislada [1, 16]. Es posible que los ERPs puedan ayudar a generar un mejor entendimiento de los mecanismos existentes en paradigmas que consideren estimulación multisensorial. Para introducirse en este campo, es conveniente efectuar un resumen de los hallazgos encontrados utilizando paradigmas intrasensoriales así como paradigmas intersensoriales.

La investigación se ha centrado en el estudio de los procesos subyacentes durante la estimulación de una vía sensorial utilizando varios atributos del estímulo. Algunos intereses se relacionan con la pregunta de si los mecanismos de atención seleccionan a los atributos del estímulo en forma independiente o en base a la configuración de atributos. Hansen y Hillyard propusieron un esquema para inferir los posibles mecanismos de atención en términos de los componentes del ERP, componentes evocados por atributos relevantes del estímulo, y como se afectan ante la presencia de un segundo atributo del estímulo [9]. Utilizando el esquema de Hansen y Hillyard, Previc y colaboradores han señalado que en experimentos visuales de atención selectiva una fase negativa temprana del ERP sugiere un análisis independiente de los atributos de tamaño y orientación del estímulo, mientras que componentes del potencial evocado más allá de los 250 milisegundos son específicos a la atención de los atributos como un conjunto [31, 43]. Es decir, la selección de los atributos del estímulo toma lugar en dos etapas que se traslapan, llamadas "específica de las características" y "específicas al conjunto". Posteriormente, Kenemans y colaboradores, utilizando un paradigma similar al de Previc, sugirieron que se puede establecer un modelo más general para el

procesamiento de los atributos visuales de orientación y frecuencia espacial [10]. Sus resultados sugieren que primero se procesan los atributos en forma aislada, probablemente en paralelo, y posteriormente el atributo relevante es detectado casi inmediatamente después de la detección de la orientación relevante, la cual es independiente de la frecuencia relevante, es decir, un procesamiento del tipo jerárquico. Componentes de latencias tardías, tales como el N2b sugieren que los atributos relevantes son procesados nuevamente, en forma independiente y posiblemente en paralelo.

La etapa de análisis independiente fue refutada en experimentos incluyendo tonos de diferente frecuencia y diferente localización, en donde la tarea del sujeto consistió en responder a un tono infrecuente de larga duración [9]. Hansen y Hillyard mostraron que un componente Nd se genera únicamente por tonos en el canal atendido, argumentando otra vez un mecanismo de selección de características en forma independiente. Retrasos en el inicio de la Nd, los cuales se obtienen al decrementar la dificultad de los atributos del estímulo, no se relacionan con un incremento en el RT o con la latencia del componente P300 a mayor duración de los estímulos relevantes. Este comportamiento sugiere un modelo "contingente-paralelo" de la selección de indicios en el cual la duración del atributo se procesa en paralelo con los atributos de localización y frecuencia del tono. Se propuso que un estímulo es rechazado tan pronto como existe evidencia de que cualquiera de los atributos no se ajusta a las especificaciones del estímulo relevante. En el caso de estímulos visuales, Previc y colaboradores han encontrado que la selección de localización se manifiesta en el ERP antes de la selección para el tipo de estímulos (color y forma) [43]. Los autores concluyen que una progresión jerárquica de procesos traslapados temporalmente gobierna la selección de información relevante, con el estímulo más complejo extraído a las latencias más tardías. En paradigmas de

atributo-dual, el estímulo relevante correspondiente a una barra de color azul en la localización correcta generó todos los componentes del ERP para los atributos de localización y color junto con una positividad tardía (P400-500) que es mayor en las regiones occipitales y precedida por una negatividad en el rango de los 225 a los 300 milisegundos. Este componente fue probablemente equivalente a la onda N200 que se genera en este rango por estímulos relevantes bajo diferentes condiciones [28]. Los resultados obtenidos sugieren que la selección para la localización precede la selección para el color, cuando las localizaciones son fácilmente discriminables, debido a que P122, índice de la selección de localización, precede a N150-300 que es un índice de la selección del color. Una selección jerárquica se estableció para estos dos componentes cuando el procesamiento del color del estímulo depende de la selección a priori de la localización. En contraste, en experimentos de localización difícil la selección del color no fue jerárquicamente dependiente de la localización.

Kenemans y colaboradores indicaron que la forma en que diferentes componentes son incluidos en el proceso de selección no depende únicamente de los atributos en base a los cuales se realiza la selección, cambia para una sola dimensión como función tanto de su discriminabilidad y de la discriminabilidad de la dimensión adicional. También sugirieron que variables relevantes como la asincronía del inicio del estímulo y el mapeo entre la combinación del estímulo relevante y la respuesta conductual pueden influir sobre el patrón de efectos del ERP [10].

Otras investigaciones se han dirigido hacia los efectos de atención intersensorial utilizando estímulos visual y auditivos que son selectivamente atendidos, es decir, se le solicita al sujeto poner atención sobre una modalidad y excluir la otra. Woods y colaboradores estudiaron los efectos de

atención intersensorial sobre ERPs auditivos comparando los ERPs auditivos bajo condiciones de atención visual y auditiva. Además, los efectos de atención intersensorial fueron estudiados sobre ERPs visuales [44]. Durante las condiciones de atención auditiva, el sujeto tenía que responder a un estímulo auditivo infrecuente en un oído específico, tono difícil o fácil de detectar, e ignorar el estímulo auditivo frecuente y el estímulo visual. En la condición de atención visual, el sujeto tenía que jugar un video-juego, el cual incrementa su dificultad, ignorando la estimulación auditiva. Los ERPs a tonos infrecuentes generaron N1 y P2, y en condiciones de atención auditiva la forma de onda del ERP también incluyó los componentes N2b y P3. Sin embargo, el componente P3 fue más corto en latencia y mayor en amplitud para la condición de fácil discriminación de los tonos. También se observó la presencia de la onda Nd, junto con una onda positiva llamada Pd y el componente MMN, obtenida restando el ERP auditivo en atención visual de aquellos en atención auditiva. En un segundo experimento, Woods y colaboradores sustituyeron el estímulo visual por una rejilla blanca-negra con una cierta frecuencia espacial y tamaño, para definir el estímulo visual frecuente o infrecuente. Tanto el estímulo visual y el auditivo incluyeron cuatro estímulos estándares y cuatro estímulos desviantes (target), la tarea del sujeto consistió en responder a los cuatro estímulos target en la modalidad especificada. Los efectos de la atención sobre los componentes del ERP durante atención auditiva fueron similares a aquellos generados en el primer experimento. Es interesante que a pesar de la complejidad acústica de la secuencia de los estímulos, los componentes de la MMN se generaron en este segundo experimento. Lo anterior sugiere que diferentes trazos de memoria acústica se establecieron para diferentes estímulos estándar. En contraste, los efectos de atención visual mostraron una modulación de los componentes del ERP visual sobre el área occipital como el aumento de P120 y una amplia negatividad de los 120 a los 300 milisegundos, una onda MMN.

Durante condiciones de atención visual el estímulo target generó componentes N2b y P3. Como en el caso de atención auditiva intersensorial, la atención visual intersensorial involucró la modulación de los componentes exógenos o la adición de componentes endógenos. El aumento de amplitud de los componentes exógenos son similares a aquellos obtenidos en paradigmas de atención visual involucrando atributos de color y espaciales. Se observó que las distribuciones espaciales de la Nd auditiva y visual son consistentes con la topografía específica de cada modalidad, es decir, una distribución fronto-central para atención auditiva y una distribución occipital para una atención visual, sugiriendo que la atención selectiva intersensorial es dependiente de la modalidad. También, debido a que el componente auditivo intersensorial Nd tiene una distribución espacial central comparada con la distribución más frontal del componente Nd que se genera en paradigmas de atención auditiva intrasensorial, mecanismos de atención intersensoriales e intrasensoriales modulan el procesamiento de información en diferentes áreas corticales. Un hecho interesante fue la persistencia del componente MMN durante atención auditiva, sugiriendo que, como en el caso auditivo aislado, puede reflejar detección automática de cambios físicos en secuencias de estímulos visuales.

Alho y colaboradores también estudiaron los efectos de atención intersensorial comparando los ERPs durante condiciones de atención auditiva con aquellos generados poniendo atención al estímulo visual [45]. La tarea del sujeto, en la condición auditiva, fue responder a un estímulo auditivo infrecuente en un cierto oído e ignorar el estímulo auditivo en el oído opuesto además de ignorar el estímulo visual. En la condición de atención del estímulo visual, al sujeto se le asignó la tarea de responder a todos los estímulos visuales e ignorar el estímulo auditivo. La forma de onda MMN junto con los componentes N2b y P3b se generaron en la condición de atención al estímulo

auditivo. Estos componentes se observaron en la forma de onda de diferencia obtenida restando el ERP generado por el tono infrecuente y el ERP del tono estándar. En la condición de estímulo visual atendido, únicamente la MMN fue generada en la onda de diferencia, confirmando que la generación de la MMN es independiente de la dirección en la atención, mientras que los componentes N2b y P3b dependen de las demandas impuestas por la tarea. En contraste, las formas de diferencia obtenidas en condiciones de atención visual, es decir, los ERPs obtenidos cuando el estímulo visual fue atendido menos los ERPs cuando no fue atendido, indicaron mayor amplitud de P120, P220 y P3b bajo condiciones de atención visual.

Squires y colaboradores estudiaron los efectos de estimulación visual y auditiva en forma simultánea, utilizando las formas de onda de los ERPs, en particular del componente P300 y el RT [21]. Utilizando tonos con dos frecuencias diferentes y flechas apuntando hacia la izquierda y hacia la derecha con diferentes probabilidades de ocurrencia, Squires y colaboradores observaron que el componente P300 bimodal se parece en latencia y amplitud al componente P300 generado por la estimulación unimodal auditiva. Este comportamiento no fue interpretado como una predominancia del estímulo auditivo debido a que anteriormente se había encontrado predominancia visual. En el trabajo de Squires y colaboradores se propuso que el comportamiento del componente bimodal P300 se debe a la diferencia de discriminabilidad entre los estímulos intersensoriales. Los resultados indicaron que la discriminabilidad entre estímulos dentro de la modalidad sensorial es un factor determinante para que una modalidad sea dominante. Variando la discriminabilidad de los estímulos se obtiene una predominancia del tipo visual. Un resultado importante indica que cuando en las dos modalidades los componentes P300 presentan latencias similares, la latencia del P300 bimodal es menor

y con una amplitud mayor que lo obtenido para cualquier de los casos unimodales.

En un tercer experimento Squires y colaboradores evaluaron el comportamiento de la P300 cuando el sujeto tiene la tarea de atender únicamente a una de las dos dimensiones e ignorar a la otra, situación llamada "tarea de filtrado". Para esta tarea es necesario tener en consideración la separabilidad e integrabilidad de las dimensiones del estímulo. Sin embargo, uno podría esperar que las dimensiones visuales y auditivas sean independientes o separables. La latencia del componente P300 del segundo experimento satisface el primer criterio para integrabilidad en el sentido que facilitación ocurre bajo condiciones de información redundante, es decir, un cambio en la información infrecuente fue proporcionada por ambas modalidades en la estimulación bimodal. Un resultado crítico de integrabilidad o separabilidad proviene de procedimientos en donde la información proporcionada por las dos modalidades es no-redundante y la atención a ambas dimensiones debería interferir con el desempeño. Si no se encuentra interferencia, las dimensiones son separables. El paradigma utilizado se constituyó por cuatro presentaciones bimodales con diferente probabilidad de ocurrencia. Una de las combinaciones auditiva-visual incluía el tono frecuente, dos combinaciones de estímulos contenían un estímulo raro en una de las modalidades y la cuarta incluía información redundante. Los resultados mostraron que la amplitud de la P300 a la combinación conteniendo los dos estímulos raros fue consistentemente mayor que cualquier de las P300 unimodales de los estímulos raros. Un estímulo raro irrelevante generó un componente P300 pequeño, mientras que un estímulo raro relevante evocó un P300 de mayor amplitud, además la P300 en la condición de los dos estímulos raros generó una mayor amplitud. De acuerdo a los resultados anteriores, las dimensiones de tono y color utilizadas en el tercer experimento deben ser consideradas como dimensiones integrales, es decir, el sujeto no excluye la dimensión irrelevante.

III.6. Propuesta de un Análisis Segmentado del Potencial Evocado Bimodal en Términos de los Potenciales Evocados Visuales y Auditivos

La intención del presente trabajo es estudiar posibles interacciones sensoriales entre las trayectorias visual y auditiva. En estimulación bisensorial es interesante analizar los componentes que forman el potencial evocado bimodal en función de la secuencia de eventos en las actividades unimodales. En otras palabras, es interesante estudiar como y cuando las actividades bimodales exógenas y endógenas adquiridas no se ajustan a la suma de las actividades unimodales correspondientes. La evaluación del desajuste entre actividades bimodales adquiridas y sintetizadas deben tomar en cuenta la relación temporal entre los procesos mentales auditivos y visuales. Un buen ejemplo de la idea anterior es la división del componente N100 bimodal y que se muestra en la figura

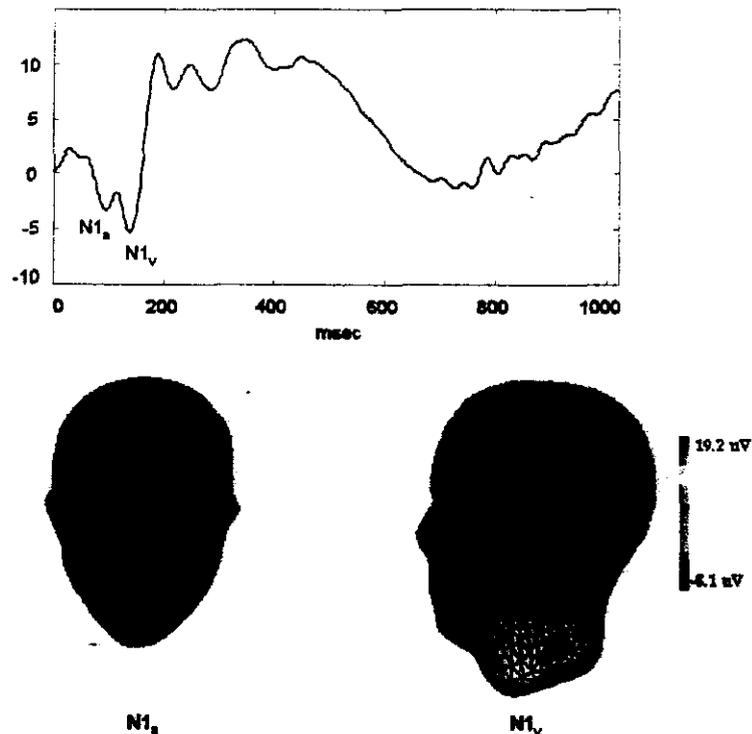


Figura III.3. División del componente bimodal N1.

III.3 para el electrodo P3. El estímulo auditivo es detectado primero, como puede corroborarse por su distribución espacial localizada en el vertex, seguido por la detección del estímulo visual con una distribución parietal-occipital. Como se puede observar, las ondas $N1_a$ y $N1_v$ difieren en latencia por alrededor de 40 milisegundos. Un aspecto a considerar es si el componente bimodal N100 es el resultado de procesos auditivos y visuales independientes o existe alguna interacción entre vías.

En la presente tesis se propone estudiar el fenómeno de interacción sensorial segmentado el potencial evocado bimodal, la segmentación se realiza en base a los procesos mentales indexados por los componentes de los potenciales evocados visuales y auditivos. Para establecer la idea del análisis segmentado, en la figura III.4 se muestran los potenciales unimodales y bimodal generados por un paradigma que incluye la asignación de una tarea al sujeto, las actividades eléctricas corresponden al electrodo Cz. En la figura III.4 (a), la actividad bimodal no sigue la morfología del potencial evocado auditivo o visual, sugiriendo que ambas actividades eléctricas son procesadas en cierta forma para generar el BEP. La representación espacial del componente P300 a los 334 milisegundos, figuras III.4 (b)-(d), muestra que la actividad bimodal es una consecuencia de alguna clase de interacción entre las informaciones visual y auditiva.

El proceso de decodificación del estímulo bimodal, indexado principalmente por los componentes N1 y P2, y posiblemente modificado por el inicio del proceso de reconocimiento de patrones, podría terminar en el punto de inflexión después del componente bimodal P200. Es importante notar que este punto de inflexión coincide temporalmente con el componente N200 visual, en donde se asume que termina el proceso de categorización del estímulo visual. De esta forma, el final de la primera ventana de análisis propuesta está marcado por el componente visual N200. De

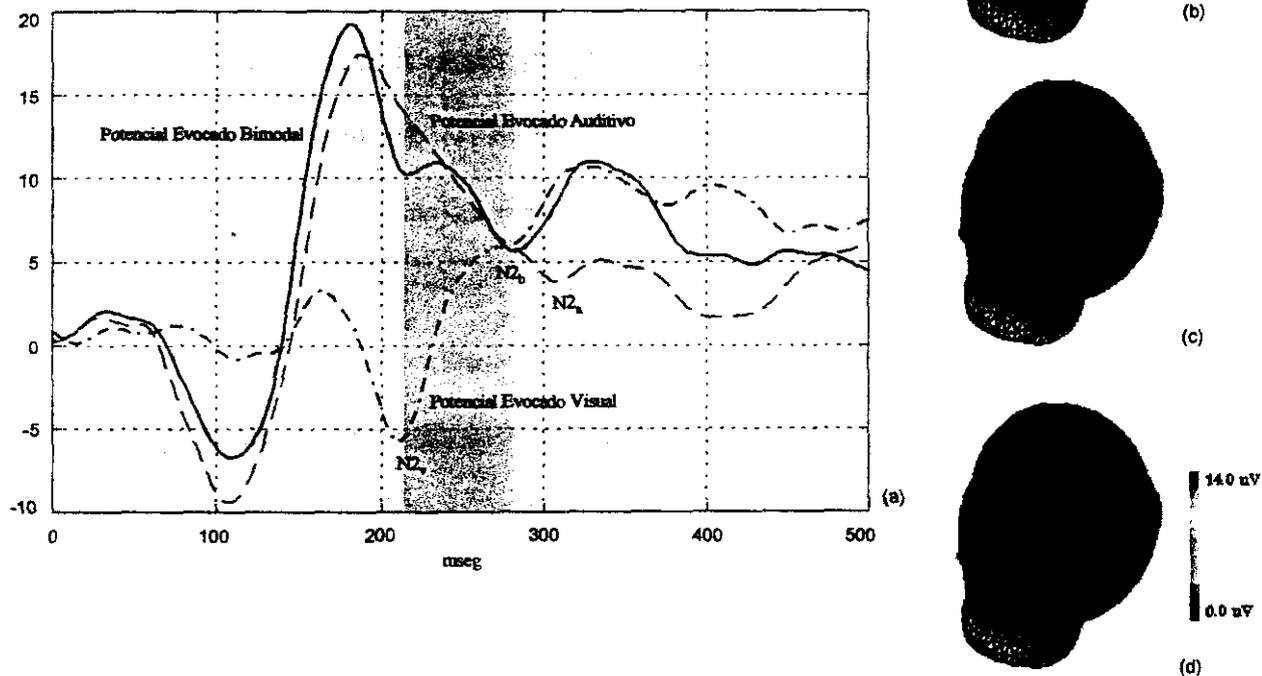


Figura III.4. Segmentación propuesta del potencial evocado bimodal. (a) $N2_b$ indica el componente bimodal N200, $N2_a$ corresponde al componente auditivo N200 y $N2_v$ indica el componente visual N200. (b)-(d) Distribución espacial de los ERPs bimodal, visual y auditivo a los 334 ms.

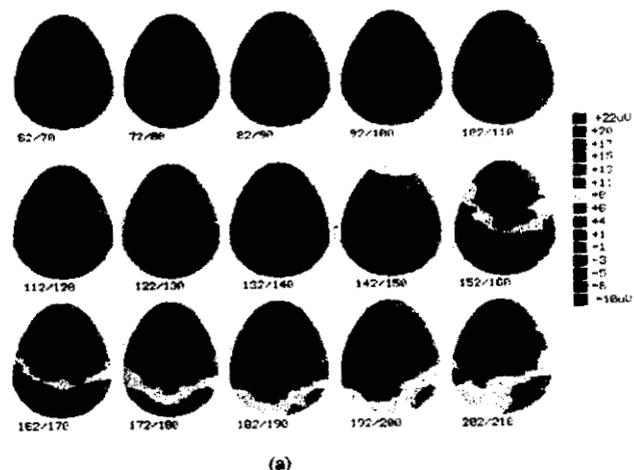
acuerdo con los procesos unimodales, el componente bimodal N200 podría estar relacionado con la terminación del proceso de categorización del estímulo bimodal. En consecuencia, la segunda ventana de análisis propuesta inicia en el punto de inflexión bimodal después del componente P200 y termina en la latencia bimodal indexada por $N2_b$. Esta ventana incluye el proceso de categorización auditiva y el proceso de post-categorización visual. También, se observa que el componente $N2_b$ se genera antes del componente auditivo $N2_a$. La última ventana de análisis propuesta incluye los procesos de

cierre unimodales y bimodal indexados por los componentes P300.

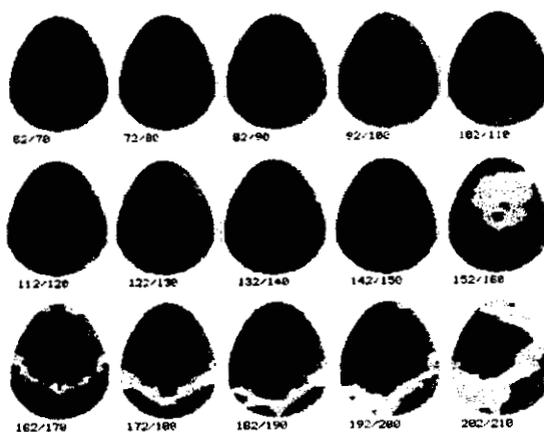
III.7. Concepto del Fenómeno de Interacción Sensorial

Hasta la fecha, generalmente se asume que el fenómeno intersensorial existe si el potencial evocado bimodal adquirido (ABEP) difiere de la suma aritmética de las actividades unimodales. Con el propósito de comparar el ABEP con el potencial sintetizado por la suma de las actividades unimodales (SBEP), el análisis segmentado propuesto se ejemplifica con los potenciales evocados de un sujeto incluido en la presente investigación. Las actividades adquirida y sintetizada para la primera ventana de análisis, definida a partir de la presentación de los estímulos a los 218 milisegundos, se muestra en la figura III.5. La inspección visual de las distribuciones espaciales muestran que el SBEP casi reproduce la actividad del ABEP, sugiriendo que la actividad bimodal es principalmente formada por la superposición lineal de las actividades unimodales. La prueba estadística de correlación omega-squared, sensitiva tanto a la forma de onda y valores de voltaje absolutos, se efectuó para medir la similitud entre las señales ABEP y SBEP. Los resultados se muestran en el primer valor de cada uno de los electrodos, figura III.6. Para la primera ventana de análisis existe alta correlación en todas las áreas del cerebro. Sin embargo, la actividad sintetizada no describe completamente los procesos de detección y decodificación de los estímulos. El componente bimodal sintetizado presenta una distribución espacial amplia, alrededor de los 100 milisegundos, en comparación con la actividad que se adquiere. Es posible que el resto de la actividad bimodal que no puede explicar el modelo de suma de actividades unimodales se deba al inicio de los procesos de reconocimiento de patrones, procesos que son dependientes del sujeto.

Las actividades incluidas en la figura III.7, relacionadas con la segunda ventana de análisis,



(a)



(b)

Figura III.5. (a) Potencial evocado bimodal adquirido, (b) actividad bimodal sintetizada por la suma de las actividades unimodales.

muestran una mayor diferencia entre el ABEP y el SBEP sugiriendo que se generan procesos más complejos que lo que puede explicar la suma de los ERPs unimodales. Parece ser que las actividades unimodales interactúan en cierta forma conduciendo a una actividad con menos duración, como puede observarse de la distribución espacial de los 262 a los 289 milisegundos. Los resultados estadísticos, segundo valor en la figura III.6, corrobora el desajuste entre las formas de onda, mostrando los valores más bajos en la región centro-parietal. El proceso de cierre sintetizado, figura

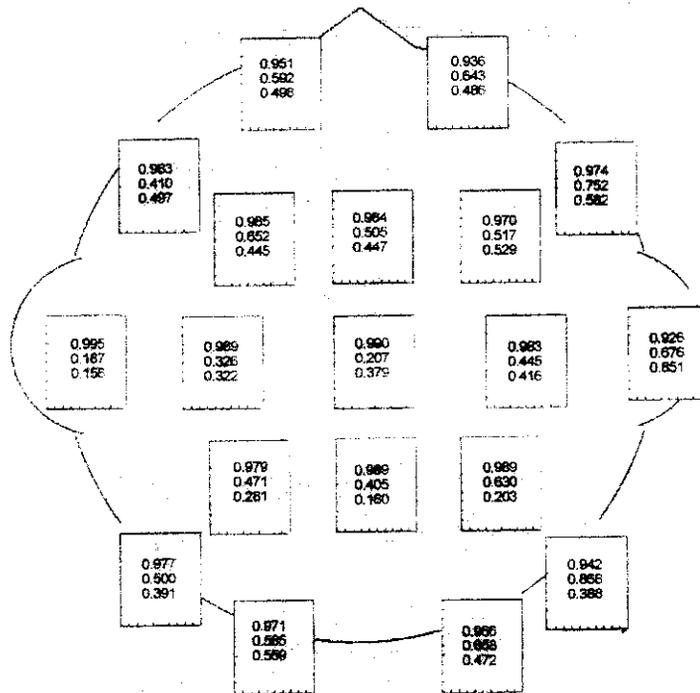


Figura III.6. Valores de correlación para las tres ventanas de análisis.

III.8, muestra un desajuste en amplitud y latencia con el proceso de cierre del potencial evocado adquirido. La P300 adquirida se genera alrededor de los 338 a los 346 milisegundos mientras que el modelo de suma predice el proceso de cierre alrededor de los 398 a los 406 milisegundos. Los valores

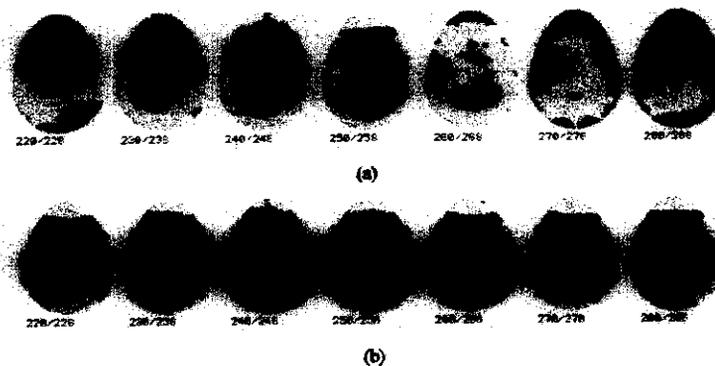


Figura III.7. El ABEP en (a) presenta una distribución espacial diferente al SBEP en (b), sugiriendo que existen relaciones intersensoriales.

de baja correlación en el tercer renglón en la figura III.6 refleja este comportamiento. Parece ser que interacciones importantes entre las trayectorias auditiva y visual definen el proceso de cierre bimodal.

En la presente investigación, el concepto de interacción sensorial se extiende utilizando la teoría de sistemas no-lineales. Se propone que si el proceso bimodal puede explicarse por la suma aritmética o por la suma ponderada de los potenciales unimodales entonces existe en las vías sensoriales un procesamiento de la información en forma independiente. En contraste, si para

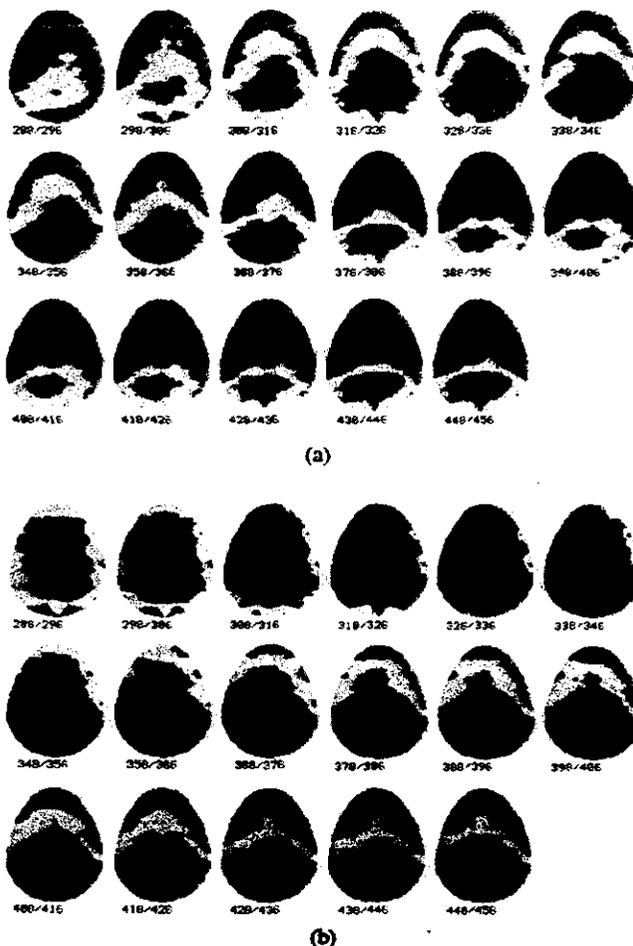


Figura III.8. La actividad sintetizada en (b) muestra una actividad de cierre más dispersa y prolongada en comparación con la actividad adquirida presentada en (a).

sintetizar la actividad bimodal se requiere incluir términos generados por el producto de la información unimodal, auditiva y visual, se asume como evidencia de interacción sensorial.

III.8. Discusión

En el presente capítulo se efectuó una descripción de los componentes de los potenciales evocados auditivos y visuales así como su posible relación con etapas del procesamiento de información en el análisis de un estímulo. En base a la posible cronometría de los procesos mentales se propone una segmentación del potencial bimodal, indexada por sus componentes, en tres ventanas de análisis. Con el propósito de enfocar el análisis del fenómeno bajo estudio, en el presente trabajo se presentaron las investigaciones relacionadas con el fenómeno intrasensorial e intersensorial utilizando actividad electrofisiológica representada por los potenciales evocados. En la descripción de los trabajos se enfatiza el comportamiento de los componentes de los potenciales evocados ante la presencia de diferentes atributos del estímulo base así como ante la presencia de estimulación multisensorial, el comportamiento de los componentes conduce a establecer modelos de procesamiento que posiblemente se ajusten a modelos independientes o jerárquicos. Además, en este capítulo se muestran las diferencias espaciales que existe entre el potencial evocado bimodal adquirido y el potencial evocado bimodal sintetizado al sumar las actividades unimodales. Como puede observarse de los mapas topográficos el modelo de suma no es suficiente para explicar la génesis del potencial evocado bimodal adquirido.

Análisis de Potenciales Evocados Multisensoriales Mediante Modelos No-Lineales

IV.1. Introducción

En diversos campos de la ingeniería es de interés inferir la posible relación entre la muestra actual de la señal de salida de un sistema y la información actual y pasada de la señal de entrada e información pasada de la señal de salida. En el estudio de sistemas dinámicos, como en el caso de la relación entre el potencial evocado bimodal y los potenciales evocados unimodales, la descripción matemática del sistema puede obtenerse mediante procedimientos de modelado o identificación [46]. El procedimiento de modelado involucra establecer ecuaciones matemáticas que describen a los procesos en base a leyes físicas, y no necesariamente requiere experimentación. Por otro lado, el “ajustar” la respuesta de un sistema a una estructura con parámetros desconocidos se denomina identificación de sistemas. El procedimiento de estimar los parámetros requiere del conocimiento a priori del sistema. El nivel de conocimiento origina diferentes tipos de modelos en la identificación. Los modelos “White-box” surgen cuando es posible construirlos a partir de conocimiento a priori y leyes físicas mientras que los modelos “grey-box” se obtienen a partir del conocimiento parcial del fenómeno quedando por determinar algunos parámetros a partir de los datos observados. En el caso de los modelos “black-box” no es posible utilizar información relacionada con la naturaleza del fenómeno [47]. Una desventaja de los modelos “black-box” es la posibilidad de que no exista una relación directa entre los parámetros del modelo y las variables físicas que rigen al fenómeno bajo estudio, en consecuencia, la aceptación del modelo para una aplicación específica depende de su “utilidad” en lugar de su “veracidad” [46]. La presente investigación se enfoca al problema de identificación de sistemas utilizando modelos “black-box”.

En la identificación de sistemas se utiliza información adquirida para determinar en forma parcial o total el modelo o estructura de un sistema desconocido. El proceso de identificación requiere las etapas correspondientes al diseño experimental, perturbación del sistema, adquisición de datos, selección de la estructura del modelo, estimación de parámetros y validación del modelo. La selección de la estructura del modelo representa la etapa más difícil en el proceso de identificación y requiere intuición y algún conocimiento del fenómeno físico bajo estudio. La selección de la estructura del modelo y el tipo de algoritmo de estimación de parámetros a ser utilizado imponen algunas limitaciones concernientes con la exactitud del modelo identificado. Es importante señalar que el proceso de identificación de sistemas es iterativo, y por lo tanto, antes de obtener un modelo "útil" puede ser necesario regresar y revisar las diferentes etapas del proceso.

En la práctica, históricamente se han utilizado modelos con estructuras lineales debido a que los resultados obtenidos con estructuras del tipo no-lineal han sido limitados. En consecuencia, los modelos no-lineales se han considerado importantes desde el punto de vista teórico. Sin embargo, existe el consenso de que los modelos con estructuras lineales representan aproximaciones de la mayoría de los fenómenos que se originan en situaciones reales. Por lo tanto, es importante investigar el desempeño de algunas técnicas no-lineales de identificación de sistemas disponibles a la fecha.

IV.5. Identificación de Sistemas No-Lineales

En el campo de los potenciales evocados la estructura lineal ha sido empleada para analizar la relación entre el potencial bimodal y los potenciales unimodales mientras que el uso de estructuras no-lineales permanece como un área de investigación por explorar [15, 48]. En las siguientes

secciones se describe, en forma general, las bases teóricas del proceso de identificación de estructuras del tipo no-lineal que serán relevantes para el análisis del fenómeno intersensorial entre las vías auditiva y visual.

IV.2.1. Filtro de Volterra

Los filtros lineales óptimos representan una alternativa importante, desde el punto de vista del procesamiento de señales, en la solución de diversos problemas prácticos. Las técnicas de filtrado lineal presentan la ventaja de la simplicidad en su formulación matemática y en su implementación. Sin embargo, la mayoría de los sistemas encontrados en situaciones reales son no-lineales y en consecuencia, los resultados de las técnicas lineales no son suficientes para explicar el fenómeno bajo estudio [49]. Como se ha mencionado, las técnicas del tipo no-lineal se evitan debido a las dificultades que surgen en los procesos de estimación de parámetros. En contraste con la caracterización matemática completa de un sistema lineal por su respuesta al impulso, la descripción de un sistema no-lineal no puede realizarse mediante un marco de referencia único. Por lo anterior, solamente algunas formulaciones matemáticas se han estudiado como por ejemplo filtros morfológicos, filtros de orden estadístico, filtros homomórficos, filtros de Volterra y otras descripciones polinomiales [50].

Tradicionalmente, la representación de sistemas no-lineales con estructura desconocida se ha efectuado mediante la serie de Volterra [51]. Sin embargo, a pesar de su popularidad teórica, el filtro de Volterra ha mostrado aplicación limitada en problemas prácticos debido a que se involucran un número excesivo de coeficientes a estimarse [52, 53]. Lo anterior origina un proceso de identificación complejo. Con el propósito de reducir la complejidad en el diseño del filtro de Volterra se han propuesto técnicas de linealización que consideran al filtro de Volterra como un filtro lineal con entradas multidimensionales. Otra forma de reducir la cantidad de coeficientes involucrados en la

estructura es limitar el orden del filtro. En la mayoría de las aplicaciones se utiliza el filtro de Volterra de segundo orden. A continuación se describe la teoría del filtro de Volterra con el propósito de establecer las bases teóricas necesarias para formular la descripción polinomial no-lineal conocida como modelo NARMAX.

Considere a $x[n]$ y $y[n]$ las secuencias de entrada y salida de un sistema discreto, causal y no-lineal. La secuencia de salida $y[n]$ puede representarse por una expansión en series de Volterra dada por:

$$\begin{aligned}
 y[n] = & h_0 + \sum_{m_1=0}^{\infty} h_1[m_1]x[n-m_1] + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} h_2[m_1, m_2]x[n-m_1]x[n-m_2] \\
 & + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \dots \sum_{m_p=0}^{\infty} h_p[m_1, m_2, \dots, m_p]x[n-m_1]x[n-m_2] \dots x[n-m_p] + \dots
 \end{aligned}
 \tag{IV.1}$$

en donde $h_p[m_1, m_2, \dots, m_p]$ se denomina el kernel de Volterra de orden p -ésimo del sistema. La secuencia de salida $y[n]$ se forma mediante convoluciones multidimensionales de los pesos del filtro con la secuencia de entrada $x[n]$. Es importante observar que el sistema cumple con el principio de superposición con respecto a los pesos del filtro, característica que puede utilizarse para determinar en forma óptima los parámetros del sistema no-lineal minimizando el error cuadrático medio (MSE). Además, la representación en la ecuación IV.1 requiere un número infinito de términos, y en consecuencia, no es de interés práctico. Con el propósito de reducir la complejidad del proceso de estimación de los parámetros del sistema frecuentemente se representa la salida del sistema en términos de una serie de Volterra truncada. Particularmente, el filtro de Volterra de segundo orden se ha estudiado con mayor detalle convirtiéndose en una de las técnicas no-lineales más populares. La expansión para la secuencia $y[n]$ en series de Volterra considerando N términos puede escribirse

donde:

$$\begin{aligned} \hat{y}[n] = & h_0 + \sum_{m_1=0}^{N-1} h_1[m_1]x[n-m_1] + \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} h_2[m_1, m_2]x[n-m_1]x[n-m_2] + \dots \\ & - \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} \dots \sum_{m_p=0}^{N-1} h_p[m_1, m_2, \dots, m_p]x[n-m_1]x[n-m_2] \dots x[n-m_p] + \dots \end{aligned} \quad (IV.2)$$

mientras que el filtro de Volterra de segundo orden queda descrito por:

$$\hat{y}[n] = h_0 + \sum_{m_1=0}^{N-1} h_1[m_1]x[n-m_1] + \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} h_2[m_1, m_2]x[n-m_1]x[n-m_2]. \quad (IV.3)$$

El filtro de Volterra de segundo orden puede considerarse compuesto de un filtro lineal con coeficientes $h_1[m_1]$ y un filtro no-lineal representado por los coeficientes $h_2[m_1, m_2]$, con N longitud de la longitud del filtro.

Asumiendo que $\hat{y}[n]$ es la salida que proporciona el modelo y $y[n]$ es la señal adquirida, ambos procesos aleatorios estacionarios con valor promedio cero, el objetivo es determinar los coeficientes del filtro de Volterra de segundo orden que minimice el MSE entre ambos procesos. El MSE por punto, queda definido como:

$$\xi = E\{|y[n] - \hat{y}[n]|^2\}. \quad (IV.4)$$

Es importante observar que la curva del MSE posee un mínimo global debido a la linealidad en los parámetros del filtro de Volterra.

El parámetro h_0 en la ecuación IV.3 puede determinarse en función de los parámetros de los términos cuadráticos del filtro y de la función de autocorrelación de la secuencia de entrada $x[n]$ si se asume que el proceso de salida $y[n]$ es un proceso sin sesgo, es decir, $E\{y[n]\} = 0$. En consecuencia, h_0 puede escribirse como:

$$h_0 = - \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} h_2[m_1, m_2] r_x(m_1 - m_2), \quad (\text{IV.5})$$

en donde $r_x(m_1 - m_2) = E\{x[n - m_1]x[n - m_2]\}$ representa la función de autocorrelación de la secuencia $x[n]$. Substituyendo la ecuación IV.5 en la ecuación IV.3, la secuencia de salida del sistema puede escribirse como:

$$y[n] = \sum_{m_1=0}^{N-1} h_1[m_1]x[n - m_1] + \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=0}^{N-1} h_2[m_1, m_2](x[n - m_1]x[n - m_2] - r_x(m_1 - m_2)). \quad (\text{IV.6})$$

En términos de vectores y matrices la ecuación IV.6 puede expresarse como:

$$y[n] = A'X(n) + tr\{B(X(n)X'(n) - R_x)\}, \quad (\text{IV.7})$$

en donde el vector $X[n]$ y las matrices A y B se definen como:

$$\begin{aligned} X(n) &= [x[n], \dots, x[n - N + 1]]', \\ A &= [h_1[0], \dots, h_1[N - 1]]', \\ B &= \begin{bmatrix} h_2[0,0] & \dots & h_2[0, N-1] \\ \vdots & & \vdots \\ h_2[N-1,0] & \dots & h_2[N-1, N-1] \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (\text{IV.8})$$

y R_x representa la matriz de autocorrelación de $x[n]$. Para el filtro con el mínimo MSE, y a partir de la ecuación IV.7, se cumple las relaciones siguientes:

$$E[X(n)y[n]] = E[X(n)A'X(n) + X(n)tr\{B(X(n)X'(n) - R_x)\}] \quad (\text{IV.9})$$

$$E[X(n)X'(n)y[n]] = E[X(n)X'(n)A'X(n) + X(n)X'(n)tr\{B(X(n)X'(n) - R_x)\}]. \quad (\text{IV.10})$$

Assumiendo que la secuencia de entrada es un proceso Gaussiano con valor promedio cero se puede demostrar que:

$$\begin{aligned}
 E[X(n)tr\{B(X(n)X'(n)-R_x)\}] &= \mathbf{0}_{N \times 1} \\
 E[X(n)X'(n)A'X(n)] &= \mathbf{0}_{N \times N},
 \end{aligned}
 \tag{IV.11}$$

en consecuencia,

$$\begin{aligned}
 R_{yx} &= E[X(n)A'X(n)] = R_x A \\
 T_{yx} &= E[X(n)X'(n)tr\{B(X(n)X'(n)-R_x)\}] = 2R_x B R_x,
 \end{aligned}
 \tag{IV.12}$$

en donde R_{yx} y T_{yx} representan las matrices de correlación cruzada y la bicorrelación cruzada, respectivamente. La función de bicorrelación cruzada mide la dependencia estadística de tercer orden entre dos señales.

La solución óptima del filtro de Volterra de segundo orden puede obtenerse a partir de la ecuación IV.12, asumiendo que la matriz de autocorrelación del proceso de entrada esta definida positivamente, como:

$$\begin{aligned}
 A_{opt} &= R_x^{-1} R_{yx} \\
 B_{opt} &= (1/2) R_x^{-1} T_{yx} R_x^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{IV.13}$$

A pesar de la simplicidad de la solución óptima mostrada en la ecuación IV.13, permanece la complejidad en la implementación del filtro de Volterra. Es decir, un filtro de Volterra de longitud N requiere del orden de N^2 operaciones en cada instante de tiempo. En la práctica es necesario establecer un compromiso entre el desempeño del filtro de Volterra y su complejidad computacional.

Es importante notar que la formulación en ecuación IV.1 considera un sistema de una sola entrada y una sola salida (SISO) sin embargo, la extensión es directa para sistemas de entradas y salidas múltiples (MIMO). La representación de sistemas MIMO es relevante para la formulación matemática del fenómeno intersensorial de interés en la presente investigación, en donde es posible establecer productos cruzados entre los procesos de entrada y el proceso de salida.

La principal desventaja del filtro de Volterra, en el estudio del fenómeno intersensorial, es la ausencia de un algoritmo para obtener los términos relevantes a partir de un filtro de orden N -ésimo que permita determinar la estructura mínima del modelo ("Parsimonious Model"). Es decir, la representación no-lineal del potencial bimodal en términos de un filtro de Volterra seguramente introducirá un número excesivo de coeficientes que tienen que estimarse y que pueden ocultar la dinámica del sistema. Sin embargo, el establecer las bases del filtro de Volterra nos permite realizar una transición directa al modelo NARMAX. El modelo NARMAX, como será evidente en las secciones siguientes, permite modelar el potencial evocado bimodal en función de las actividades eléctricas unimodales, y en consecuencia, analizar las posibles interacciones entre vías sensoriales.

IV.2.2. Modelo No-Lineal Autorregresivo de Promedio Móvil con Entradas Exógenas (NARMAX)

IV.2.2.1. Introducción

El modelo Autorregresivo de Promedio Móvil con Entradas Exógenas (ARMAX) es ampliamente utilizado en problemas de identificación de sistemas, sin embargo, el modelo exhibe las limitaciones inherentes a estructuras del tipo lineal. Diversos métodos se han propuesto para la identificación de sistemas no-lineales, la mayoría requiere la definición a priori de la estructura del modelo. En consecuencia, la mayoría de los algoritmos son en realidad algoritmos de estimación de parámetros. Afortunadamente, existen algoritmos que consideran tanto la selección de la estructura del modelo así como la estimación paramétrica. Para modelos lineales del tipo "black-box" el procedimiento de identificación de sistemas está relacionado directamente con la descripción de la respuesta al impulso mientras que en el escenario no-lineal el proceso de identificación se complica.

En el proceso de identificación no-lineal existen diversas posibilidades para la descripción del modelo, y nada se puede excluir al inicio del proceso. El modelo general no-lineal "black-box" puede concebirse como un mapeo de los datos observados a un espacio de regresores, y del espacio de regresores, mediante un mapeo no-lineal, al espacio de salidas del sistema [54]. La selección de la estructura del modelo es una etapa esencial en el proceso de identificación de sistemas no-lineales debido a que un incremento en el grado del modelo resultará en un modelo excesivamente complejo de poca utilidad práctica, y posiblemente numéricamente mal condicionado [55].

En general, el proceso de identificación de sistemas no-lineales involucra dos etapas. En la primera etapa se seleccionan las funciones bases relevantes mientras que en la segunda etapa se aplica el algoritmo de mínimos cuadrados lineal para determinar los parámetros de la función de aproximación. Recientemente, el modelo NARMAX introducido por Billings y col. se ha convertido en una de las técnicas prácticas más utilizadas en la identificación de sistemas no-lineales [52,56]. El modelo no-lineal de Billings es una extensión de la representación lineal ARMAX siendo también lineal con respecto a sus parámetros. En una descripción del tipo NARMAX, la estructura del sistema se aproxima en términos de una expansión no-lineal en función de entradas actuales y pasadas, salidas pasadas y errores de predicción. Cuando la estructura del modelo es conocida, es decir, la función no-lineal esta bien determinada, el procedimiento de identificación se limita a estimar los valores de los parámetros del sistema. Sin embargo, en la mayoría de los problemas prácticos se desconoce la estructura del modelo y es necesario aproximarla por medio de funciones no-lineales conocidas, como por ejemplo, polinomios, funciones radiales, etc. [52, 57, 58]. Chen y Billings han demostrado que las funciones no-lineales pueden aproximarse con un buen grado de exactitud mediante representaciones polinomiales [55]. En la presente investigación, el estudio del fenómeno

intersensorial se efectuará mediante su formulación matemática no-lineal utilizando funciones polinomiales en la descripción NARMAX.

Además de seleccionar un conjunto de funciones no-lineales, es necesario contar con un algoritmo de identificación eficiente para obtener un modelo con una estructura mínima ("Parsimonious Model") debido al número excesivo de términos que inicialmente son candidato para formar la estructura del modelo. Es decir, es necesario seleccionar los términos relevantes a partir de un gran número de posibles términos iniciales. Billings y col. han propuesto una extensión a procedimientos de ortogonalización, como el algoritmo de Gram-Schmidt modificado, para contender con la selección de la estructura del modelo y proveer una estimación paramétrica sin sesgo [55].

IV.2.2.2. El Problema Básico

Como se indicó, el objetivo de la identificación de sistemas es obtener, utilizando únicamente información adquirida, un modelo "exacto" del sistema. La exactitud del modelo identificado puede definirse de varias formas, sin embargo, el objetivo final es el mismo. Es decir, para una entrada dada, la salida i -ésima del modelo $y_i[n]$ debe ser una buena aproximación a la salida adquirida del sistema. Un método para determinar la exactitud del modelo identificado, y probablemente el método más utilizado, es medir la desviación de la salida del modelo con respecto de la salida del sistema. Esta medida de exactitud se conoce como mínimos cuadrados y permite la determinación de los parámetros involucrados en la estructura del modelo.

Para formular la descripción matemática no-lineal del fenómeno intersensorial es conveniente establecer algunos conceptos y terminología del modelo NARMAX. Sea el par aleatorio (u, y) la

entrada-salida de un sistema con valores en los dominios $u \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}$, respectivamente. La función $f : u \rightarrow y$ se denomina función de regresión de y sobre u ; un caso típico es $y = f(u) + e$ en donde e , un proceso de valor promedio cero e independiente de u , representa la parte de la secuencia de salida que no es posible predecir utilizando datos pasados. La idea es proporcionar un estimado de $f(\cdot)$ utilizando el conocimiento que se puede obtener de la información entrada-salida adquirida. El estimador de $f(\cdot)$ es de tipo paramétrico si $\hat{f}(\cdot) \in F$, en donde F es un conjunto de funciones definidas en términos de un número finito de parámetros desconocidos.

En el método paramétrico, relevante para la presente investigación, es necesario buscar la mejor estimación posible de $f(\cdot)$, $\hat{f}(\cdot)$, dentro de una familia de funciones conocidas y realizar la estimación de los parámetros correspondientes. En consecuencia, la función $f(\cdot)$ puede escribirse en términos de un vector de parámetros Θ de dimensión finita como $f(U[n-1], Y[n-1], \Theta)$; es decir, la función $f(\cdot)$ se ha parametrizado, en donde los vectores de entrada y salida se definen como $U'(n-1) = [u[1] \ u[2] \ \dots \ u[n-1]]$ y $Y'(n-1) = [y[1] \ y[2] \ \dots \ y[n-1]]$. Una vez que se establece la estructura del modelo y se dispone de K pares de datos entrada-salida, la "calidad" del vector de parámetros Θ puede medirse utilizando el índice de desempeño:

$$\sum_{n=1}^K \|y[n] - f(U(n-1), Y(n-1), \Theta)\|^2. \quad (\text{IV.14})$$

Como se indicó, es útil considerar $f(\cdot)$ como la concatenación de dos operaciones de mapeo con el fin de establecer un marco de referencia general para el proceso de identificación de sistemas no-lineales [54]. Los valores pasados de las secuencias de entrada y salida son mapeadas primeramente a un vector de dimensión finita, es decir, $\varphi(n) = \varphi(U(n-1), Y(n-1))$ y posteriormente el vector $\varphi(n)$ se mapea al espacio de las salidas del sistema. En consecuencia, la función

parametrizada $f(\cdot)$ puede determinarse como:

$$f(U(n-1), Y(n-1), \Theta) = f(\varphi(n), \Theta), \quad (\text{IV.15})$$

en donde el vector $\varphi(n)$ se denomina vector de regresión y a sus componentes como los regresores. Por lo tanto, el problema original de identificación se divide en dos partes: (a) la selección del vector de regresión y (b) la selección del mapeo no-lineal $f(\varphi)$, a partir del espacio de los regresores al espacio de las salidas.

Los regresores en la ecuación IV.15 se constituyen, en general, en términos de entradas pasadas $u[n-k]$, valores de salida pasados $y[n-k]$ y errores de predicción $\varepsilon(n-k)$. Los errores de predicción se definen como $\varepsilon[n-k] = y[n-k] - \hat{y}[n-k|\Theta]$, en donde el término $\hat{y}[n-k|\Theta]$ representa el valor que predice el modelo y $k \in [1, N]$.

Por lo que respecta al mapeo no-lineal $f(\varphi(n), \Theta)$ puede considerarse como una expansión de funciones del tipo:

$$f(\varphi(n), \Theta) = \sum \alpha_k f_k(\varphi), \quad (\text{IV.16})$$

en donde $f_k(\cdot)$ se denomina la función base [54]. La selección de las funciones $f_k(\cdot)$ pueden definirse en diferentes formas utilizando ondillas ("Wavelets"), funciones de base radial ("Radial Basis Functions"), estructuras recurrentes, etc. Particularmente de interés para este proyecto es la versión polinomial del modelo NARMAX que puede considerarse como un caso especial de la expresión general en la ecuación IV.16. La expansión polinomial es relevante para la investigación del fenómeno intersenserial debido a que proporciona una interpretación directa de las posibles contribuciones lineales y no-lineales en la formación del potencial evocado bimodal.

Una vez que se han seleccionado los regresores del vector $\varphi(n)$ y las funciones base $f_k(\cdot)$, es necesario estimar los parámetros α_k de la ecuación IV.16. La determinación de los parámetros se

realiza seleccionando los regresores relevantes o significativos que deben ser incluidos en la descripción del sistema. Adicionalmente, se deben de realizar diversas pruebas para probar el modelo obtenido. En las siguientes secciones las etapas antes mencionadas se discutirán en detalle para la versión polinomial del modelo NARMAX. Además, se discutirán tópicos relacionados con la “bondad” del modelo no-lineal y con el error de predicción denominado “one step ahead prediction error”.

IV.3. Modelo NARMAX

La representación general de un modelo de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) dada por la ecuación de diferencias no-lineal:

$$Y(n) = f(Y(n-1), \dots, Y(n-n_y), U(n-1), \dots, U(n-n_u), e(n-1), \dots, e(n-n_e)) + e(n) \quad (\text{IV.17})$$

con m salidas y r entradas, describe a una amplia clase de sistemas no-lineales de tiempo discreto [55, 57, 58]. En la ecuación IV.17 los vectores de entrada, salida, error residual y de funciones se definen como:

$$Y(n) = \begin{bmatrix} y^1[n] \\ \dots \\ y^m[n] \end{bmatrix} \quad U(n) = \begin{bmatrix} u^1[n] \\ \dots \\ u^r[n] \end{bmatrix} \quad e(n) = \begin{bmatrix} e^1[n] \\ \dots \\ e^m[n] \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f^1[n] \\ \dots \\ f^m[n] \end{bmatrix}, \quad (\text{IV.18})$$

en donde las variables n_y , n_u y n_e denotan los retrasos sobre las secuencias correspondientes. La representación del sistema dada por la ecuación IV.17 puede descomponerse en m ecuaciones de diferencia no-lineales escalares de la forma:

$$\begin{aligned}
y^i[n] = & f^i(y^1[n-1], \dots, y^1[n-n_y], \dots, y^m[n-1], \dots, y^m[n-n_m], \\
& u^1[n-1], \dots, u^1[n-n_u], \dots, u^r[n-1], \dots, u^r[n-n_r], \\
& e^1[n-1], \dots, e^1[n-n_e], \dots, e^m[n-1], \dots, e^m[n-n_e]) + e^i[n],
\end{aligned} \quad (IV.19)$$

en donde $i \in [1, m]$. En una sección posterior la versión MISO de la ecuación de diferencias definida en IV.17 será utilizada para describir la relación entre el potencial evocado bimodal y las actividades unimodales visual y auditiva.

Como se ha mencionado, para propósitos de identificación utilizando la ecuación IV.17 ó IV.19, es conveniente parametrizar la ecuación de diferencias y expresarla mediante una expansión polinomial de grado l , es decir:

$$y^i[n] = \theta_0^i + \sum_{i_1=1}^n \theta_{i_1}^i x_{i_1}[n] + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \theta_{i_1 i_2}^i x_{i_1}[n] x_{i_2}[n] + \dots + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_l=i_1-1}^n \theta_{i_1 \dots i_l}^i x_{i_1}[n] \dots x_{i_l}[n] + e^i[n], \quad (IV.20)$$

en donde $i = 1 \dots m$, $n = m \cdot n_y + r \cdot n_u + m \cdot n_e$ y cada uno de los términos x_i en la expansión polinomial se definen como:

$$\begin{aligned}
x_1[n] &= y^1[n-1], & x_2[n] &= y^1[n-2], \dots, & x_{m \cdot n_y}[n] &= y^m[n-n_y], \\
x_{m \cdot n_y + 1}[n] &= u^1[n-1], & x_{m \cdot n_y + 2}[n] &= u^1[n-2], \dots, & x_{m \cdot n_y + r \cdot n_u}[n] &= u^r[n-n_u], \\
x_{m \cdot n_y + r \cdot n_u + 1}[n] &= e^1[n-1], & x_{m \cdot n_y + r \cdot n_u + 2}[n] &= e^1[n-2], \dots, & x_n[n] &= e^m[n-n_e].
\end{aligned}$$

De la ecuación IV.20 es evidente que $l = 1$ genera únicamente elementos lineales en la descripción de $y^i[n]$ mientras que para $l > 1$ elementos no-lineales son incorporados en la descripción. Es importante observar que cada uno de los subsistemas en la ecuación IV.20 puede asumirse como una ecuación de regresión lineal de la forma:

$$z[n] = \sum_{j=1}^M p_j[n] \theta_j + e^i[n], \quad n=1, \dots, N \quad (IV.21)$$

en donde M representa el número total de posibles regresores, es decir, si el grado del polinomio es $l=1 \rightarrow M=n$ o si $l=2 \rightarrow M=n + \sum_{i_2=1}^n i_2$, etc. En la ecuación IV.21 los términos $p_j[n]$ son monomios desde $x_1[n]$ hasta $x_n[n]$ o productos de estos monomios, en particular el término $p_1[n]$ corresponde a un valor constante. El término $e^i[n]$ representa el error residual mientras que θ_j son los parámetros del modelo a ser estimados.

La ecuación IV.21 puede escribirse en términos de vectores y matrices considerando:

$$z = \begin{bmatrix} z[1] \\ \dots \\ z[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y^i[n-N] \\ \dots \\ y^i[n] \end{bmatrix}, \quad \Xi = \begin{bmatrix} e^i[n-N] \\ \dots \\ e^i[n] \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dots \\ \theta_M \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} p_1[1] & \dots & p_M[1] \\ \dots & \dots & \dots \\ p_1[N] & \dots & p_M[N] \end{bmatrix}$$

como:

$$z = P \Theta + \Xi, \quad \forall i=1, \dots, m \quad (\text{IV.22})$$

Dado que las funciones f^i no se conocen a priori, al inicio del proceso de identificación todos los elementos de la matriz de regresión tienen que ser considerados. Las únicas variables que pueden seleccionarse son las entradas, las salidas, los retrasos, n_u , n_y y n_e y el grado l del polinomio. Asumiendo que los términos significativos de la matriz de regresión P se conocen de antemano, el problema se reduce a la estimación del vector de parámetros Θ por medio de un procedimiento de mínimos cuadrados lineal que minimice la norma euclidiana $\|z - P \Theta\|$. La solución a este problema es la bien establecida ecuación normal:

$$P'P \Theta = P'z \quad (\text{IV.23})$$

Sin embargo, los términos relevantes de P no se conocen a priori y todas las columnas de P tienen que ser tomadas en cuenta lo cual implica un número excesivo de términos y en consecuencia

un modelo complejo y de poca utilidad. Como se ha mencionado, es deseable encontrar un modelo que involucre una pequeña fracción de los términos candidatos de P ("Parsimonious Model"). Por lo tanto, el problema de identificación de sistemas es en realidad un problema que combina la selección de un subconjunto P_s de P y la estimación del vector de parámetros Θ_s , que minimiza la correspondiente norma euclidiana.

La estimación paramétrica puede realizarse para todas las posibles estructuras del modelo y seleccionar la mejor en base a un índice de desempeño sin embargo, a pesar de ser un procedimiento directo es impráctico. Varios índices de desempeño se han propuesto para seleccionar el mejor modelo, la Tabla IV.I presenta un resumen de los índices más frecuentemente utilizados. En la Tabla \hat{y} representa la señal originada por el modelo mientras que \bar{y} indica el valor promedio de la secuencia. Los primeros cinco criterios tienen la característica de proporcionar "buenos" modelos sin embargo, incluyen demasiados parámetros [59]. Para evitar este problema es necesario seleccionar reglas que tomen en cuenta la complejidad del modelo, los últimos cuatro criterios de la tabla realizan esta función.

Una forma práctica de seleccionar la estructura del modelo es aplicar los algoritmos de regresión denominados "stepwise", "forward" y "backward". El algoritmo de regresión "stepwise" inicia considerando únicamente el término más significativo; en una segunda etapa, la estructura del modelo se incrementa agregando el segundo término más significativo, etc. El procedimiento de selección del término más significativo, a partir de un conjunto de posibles términos, puede realizarse de formas diferentes. Por ejemplo, el término más significativo puede ser el término que presente: (a) la correlación parcial más grande con la señal de salida, (b) el decremento más grande de la suma cuadrática del error residual, o (c) el incremento más grande en la correlación múltiple. Es posible

que un término seleccionado en una etapa pueda resultar irrelevante en una etapa posterior debido a que los términos del modelo pueden estar correlacionados. Por lo tanto, el procedimiento de selección debe incluir la evaluación de algún índice que permita evitar estas situaciones. Algunos de los índices de la Tabla IV.I, como el criterio de Akaike, se han utilizado para tal propósito.

Los algoritmos de regresión "forward" y "backward" son casos especiales del algoritmo "stepwise". En el caso del algoritmo "forward" únicamente términos sin evaluar pueden ser incorporados al modelo y términos previamente aceptados no pueden ser eliminados. Para el caso del algoritmo "backward", el algoritmo inicia considerando todos los posibles términos y cada uno de los términos son evaluados con el propósito de decidir si son eliminados. Es importante señalar que la eficiencia de ambos algoritmos depende de como sean ordenados los posibles términos del modelo. Este no es el caso del algoritmo "stepwise" o de la versión modificada del algoritmo "forward" que considera en el procedimiento de selección la ortogonalización de los términos. La selección de la estructura del modelo NARMAX que se aplica en esta investigación se basa en el algoritmo de regresión "forward" utilizando un procedimiento de ortogonalización.

La determinación del vector de parámetros Θ_s , mediante el procedimiento de mínimos cuadrados establecido en la ecuación IV.23, puede realizarse de tres formas: (a) solución de la ecuación normal mediante eliminación Gaussiana o la descomposición Cholesky de $P'P$, (b) descomposición ortogonal de P y (c) descomposición en valores singulares de P . El segundo método es el más exacto y evita la posibilidad de un mal condicionamiento ("Ill-Conditioning") de $P'P$. La descomposición ortogonal de P puede efectuarse mediante el procedimiento de ortogonalización de Gram-Schmidt o su versión modificada, la transformación de Householder, o método de Givens. El método modificado de Gram-Schmidt (MGS) tiene la ventaja de no ser sensible a errores de redondeo

en comparación con el método de Gram-Schmidt y es más exacto que el método Householder, sin embargo, computacionalmente es un poco más complejo [55].

Tabla IV.1. Índices de desempeño.	
Nombre	Descripción matemática
“Residual sum of squares”	$RSS = \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k) - y]^2 = \sum_{k=1}^N e^2(k)$
“Total sum of squares”	$TSS = \sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2$
“Sum of squares”	$SS = \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k) - \bar{y}]^2$
“Normalized residual sum of squares”	$NRSS = RSS / N$
“Multiple correlation coefficient”	$R^2 = SS / TSS = 1 - RSS / TSS$
“Adjusted multiple correlation coefficient”	$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-M_s}$
“F-test”	$FT = \frac{SS}{RSS} \frac{N-M_s}{M_s-1}$
“Final prediction error”	$FPE = N \cdot \ln(NRSS) + N \cdot \ln \left[\frac{N+M_s}{N-M_s} \right]$
“Akaike’s information criterion”	$AIC(p) = N \cdot \ln(NRSS) + p \cdot M_s$

Es importante notar, que el problema combinado de la selección de la estructura del modelo y la estimación paramétrica puede llevarse a cabo utilizando una extensión de la descomposición ortogonal MGS como se muestra en los siguientes párrafos.

Como se mencionó, en la solución de la ecuación IV.23 es importante evitar obtener la inversa

de la matriz $P'P$ debido a los problemas numéricos que pueden presentarse. Un procedimiento más adecuado es factorizar y utilizar la descomposición ortogonal de la matriz P para resolver una ecuación equivalente en donde mediante sustitución hacia atrás pueda proporcionar los valores del vector de parámetros Θ_s . Debido a que la matriz P es una matriz de rango completo su factorización esta dada por:

$$P = WA, \quad \text{en donde} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1M} \\ 0 & 1 & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2M} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \alpha_{M-1M} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad W = [w_1 \dots w_M] \quad (\text{IV.24})$$

y la matriz W , de dimensiones $N \times M$, tiene columnas ortogonales que satisfacen $W'W = D$, en donde D es una matriz diagonal definida positivamente. La solución para el vector de parámetros Θ_s puede determinarse substituyendo la ecuación IV.24 en IV.23:

$$\begin{aligned} P'P \Theta_s &= P'z \\ A'W'WA \Theta_s &= A'W'z \\ DA \Theta_s &= W'z \\ A \Theta_s &= D^{-1}W'z = g. \end{aligned} \quad (\text{IV.25})$$

A partir de la ecuación IV.25, el vector de parámetros Θ_s puede calcularse por substitución hacia atrás debido a que la matriz A es una matriz triangular superior. Además, de la ecuación IV.24 y la condición $W'W = D$ es fácil demostrar que la matriz A puede escribirse como $A = D^{-1}W'P$, de donde pueden obtenerse los elementos de A .

El procedimiento MGS obtiene un renglón de la matriz A a cada tiempo y ortogonaliza la matriz P de acuerdo a:

$$\begin{aligned}
w_k &= P_k^{(k-1)} \\
\alpha_{ki} &= \frac{\langle w_k, P_i^{(k-1)} \rangle}{\langle w_k, w_k \rangle}, \quad i=k+1, \dots, M \\
P_i^{(k)} &= P_i^{(k-1)} - \alpha_{ki} w_k, \quad i=k+1, \dots, M \\
w_M &= P_M^{(M-1)}.
\end{aligned}
\tag{IV.26}$$

En la ecuación anterior el índice superior indica la etapa en el procedimiento, el índice inferior denota el número de columna en la matrices P y W mientras que el símbolo $\langle \cdot \rangle$ denota el producto interno.

Las tres primeras ecuaciones en IV.26 se aplican para $k=1$ hasta $k=M-1$ con $p_i^0 = p_i$, $i=1, \dots, M$; en la k -ésima etapa las columnas de P indexadas desde $k+1$ hasta M son ortogonalizadas con respecto de la k -ésima columna. Una vez que se determinan las matrices W y A los elementos de g , en la ecuación IV.25, pueden ser obtenidos.

En este punto del algoritmo es relevante extender el procedimiento anterior con el propósito de seleccionar en forma simultánea los términos significativos de P y generar un modelo de estructura mínima ("Parsimonious Model"). Considere la ecuación IV.22 en términos de la factorización $P=WA$ asumiendo que se han seleccionado M_s términos, es decir:

$$\begin{aligned}
z &= P_s \Theta_s + \Xi \\
&= (P_s A_s^{-1})(A_s \Theta_s) + \Xi = W_s g_s + \Xi.
\end{aligned}
\tag{IV.27}$$

Si se considera la suma cuadrática:

$$\begin{aligned}
\langle z, z \rangle &= \sum_{i=1}^{M_s} g_i^2 \langle w_i, w_i \rangle + \langle \hat{\Xi}, \hat{\Xi} \rangle \\
1 &= \sum_{i=1}^{M_s} g_i^2 \frac{\langle w_i, w_i \rangle}{\langle z, z \rangle} + \frac{\langle \hat{\Xi}, \hat{\Xi} \rangle}{\langle z, z \rangle},
\end{aligned}
\tag{IV.28}$$

se observa que el primer término del lado derecho de la ecuación IV.28 sugiere una forma de calcular W_s a partir de P , es decir, cada elemento en la sumatoria provee una porción de la varianza de la

variable dependiente relacionada con w_j . En base a lo anterior, la ecuación IV.28 puede reescribirse como:

$$1 - \sum_{i=1}^{M_k} err_i = \sigma_e^2 / \sigma_z^2, \quad (IV.29)$$

es decir, entre más grande sea el valor de err_i en IV.29, la reducción de la varianza del error residual es mayor conforme se incluyan términos significativos en la estructura del modelo. En consecuencia, el procedimiento dado en la ecuación IV.26 puede modificarse y resumirse como sigue: en la k -ésima etapa, para $i=k, \dots, M$, se calcula:

$$g_k^i = \frac{\langle P_i^{(k-1)} \rangle \cdot z^{(k-1)}}{\langle P_i^{(k-1)} \rangle \cdot P_i^{(k-1)}}, \quad err_k^i = \frac{g_k^i \cdot \langle P_i^{(k-1)} \rangle \cdot P_i^{(k-1)}}{\langle z \cdot z \rangle} \quad (IV.30)$$

y se obtiene la posición del valor máximo de err_k^i . Si el valor máximo de err_k^i corresponde a la posición j -ésima, es necesario intercambiar la j -ésima columna con la k -ésima columna de la matriz $P^{(k-1)}$. Es decir, el j -ésimo elemento de err_k^i indica que el j -ésimo regresor en la matriz P es el más significativo. Además, es necesario actualizar la matriz A , la j -ésima columna de la matriz A se intercambia con la k -ésima columna desde el primer renglón hasta el $(k-1)$ -ésimo renglón. El algoritmo continúa como se indica en la ecuación IV.26. Es importante observar que en la k -ésima etapa la matriz $P^{(k-1)}$ esta constituida como $P^{(k-1)} = [w_1 \dots w_{k-1} P_k^{(k-1)} \dots P_M^{(k-1)}]$, es decir, el procedimiento produce columnas ortogonales en cada etapa. El procedimiento de ortogonalización coloca el término más significativo en la primera columna, el segundo más significativo en la segunda columna, etc. La selección de los términos termina cuando la expresión en la ecuación IV.29 es menor a un cierto umbral, definido a priori.

Los elementos del vector g se determinan para $k=1, \dots, M$ mediante la ecuación:

$$g_k = \frac{\langle \mathbf{w}_k, \mathbf{z}^{(k-1)} \rangle}{\langle \mathbf{w}_k, \mathbf{w}_k \rangle} \quad (\text{IV.31})$$

$$\mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{z}^{(k-1)} - g_k \mathbf{w}_k, \quad k=1, 2, \dots, M$$

en donde el índice superior indica la etapa en el proceso de selección y el subíndice indica el renglón o columna. Como se ha mencionado, el criterio dado en IV.29 incluye demasiados elementos significativos en P , y por lo tanto, es necesario incluir un criterio que permita tomar en cuenta la complejidad del modelo. En la presente investigación el criterio de Akaike es utilizado con este propósito.

Se requiere un paso final en el proceso de identificación. Debido a que el modelo polinomial NARMAX incluye elementos de la secuencia de ruido y esta secuencia no es posible medirla, es necesario reemplazar $e[n]$ por el error de predicción o error residual $\varepsilon[n]$. En consecuencia, la matriz de regresores P del i -ésimo submodelo puede establecerse como $P_i = [P_{p_i} : P_{n_i}]$ en donde la matriz de regresión P_{p_i} depende únicamente de los datos de entrada-salida mientras que P_{n_i} se constituye a partir de los errores de predicción. El proceso es como sigue: primero, $M_{p_{si}}$ términos se seleccionan de P_{p_i} , la selección puede terminarse utilizando la ecuación IV.29. Un vector de parámetros iniciales $\Theta_{p_{si}}$ puede obtenerse con el propósito de calcular una secuencia de error residual inicial $\{\varepsilon^{(1)}[n]\}$. En segundo lugar, la matriz de regresión P_{n_i} se forma y se puede llevar a efecto la selección de $M_{n_{si}}$ términos significativos hasta que se satisfaga el índice de desempeño:

$$1 - \sum_{i=1}^{M_{p_{si}} + M_{n_{si}}} \text{err}_i < \rho_{ni} \quad (\text{IV.32})$$

Finalmente, se calcula el vector de parámetros $\Theta_{si}^{(k)}$ de dimensiones $(M_{p_{si}} + M_{n_{si}}^{(k)}) \times 1$.

IV.4. Resultados del Modelo NARMAX con Datos Sintetizados

En esta sección, el procedimiento de ortogonalización modificado de Gram-Schmidt para determinar la estructura y los valores de los coeficientes del modelo se muestra en base a señales sintetizadas. El modelo considera un sistema con una salida y dos entradas, incluyendo 4 términos lineales y 3 no-lineales. Como señales de entrada al modelo se utilizan potenciales evocados visuales y auditivos obtenidos en uno de los experimentos de la presente investigación. El modelo que se ocupa para evaluar el funcionamiento del algoritmo se define como:

$$y[n] = u_1[n-1] + 0.9u_1[n-6] + 0.5u_2[n-1] + 0.4u_2[n-8] + 0.7u_1[n-1]u_1[n-5] + 0.2u_2[n-1]u_2[n-4] + 0.045u_1[n-1]u_2[n-1]. \quad (\text{IV.33})$$

En la figura IV.1 se muestran las señales $u_1[n]$ y $u_2[n]$ utilizadas en la ecuación IV.33 así

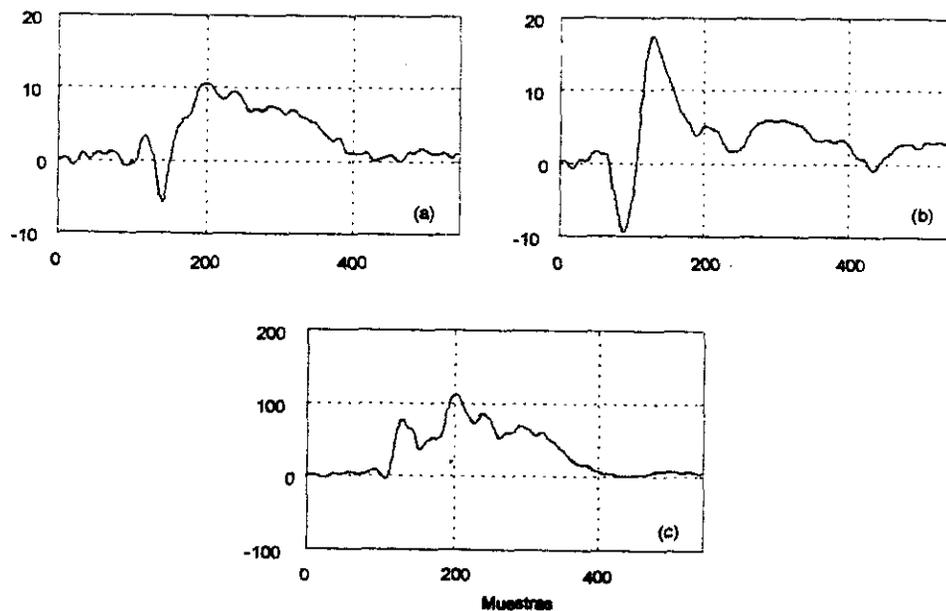


Figura IV.1. (a) Señal $u_1[n]$ formada utilizando un potencial evocado visual, (b) Señal $u_2[n]$ formada utilizando un potencial evocado auditivo, (c) Salida del modelo no-lineal representado por la ecuación IV.33.

como la señal de salida, $y[n]$, generada por el modelo. El procedimiento de ortogonalización modificado de Gram-Schmidt se aplicó a los datos sintetizados utilizando un grado del polinomio $l=2$ y retrasos de 0, 14 y 0 para n_v, n_U y n_e , respectivamente. Los resultados muestran la robustez del procedimiento ya que los parámetros estimados del modelo coinciden con los coeficientes utilizados en la ecuación IV.33.

Sin embargo, en la práctica es difícil de obtener datos libres de ruido. En el caso de los potenciales evocados, una de las posibles fuentes de ruido es la técnica de promediación. Como se ha mencionado anteriormente, la relación señal a ruido depende directamente del número de épocas promediadas. Por esta razón es importante considerar el funcionamiento del algoritmo ante la presencia de ruido tanto en los potenciales unimodales como en la señal de salida del modelo de la ecuación IV.33. La figura IV.2 muestra las señales de ruido que se agregan a las señales de la figura IV.1 para demostrar el desempeño del algoritmo MGS.

Para comparar resultados en la estimación del vector de parámetros, el algoritmo MGS se

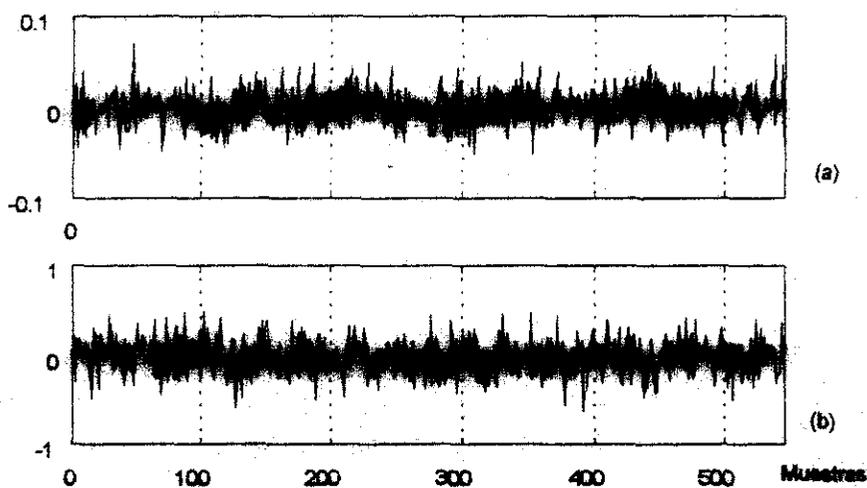


Figura IV.2.(a) Señal de ruido que se suma a las señales de entrada en la ecuación IV.33, (b) señal de ruido que se agrega a la salida del modelo.

aplica a las señales con ruido utilizando los mismos valores para el orden y retrasos del ejemplo anterior. En la tabla IV.2 se muestran los valores de los parámetros estimados y sus regresores correspondientes.

Tabla IV.2. Resultados del modelo NARMAX.		
Posición	θ	Regresor
3	1.122	$u_1[n-2]$
6	0.571	$u_1[n-5]$
10	0.193	$u_1[n-9]$
16	0.531	$u_2[n-1]$
20	-0.067	$u_2[n-5]$
23	0.441	$u_2[n-8]$
31	0.044	$u_1[n-1]u_1[n-2]$
34	0.391	$u_1[n-1]u_1[n-5]$
35	0.310	$u_1[n-1]u_1[n-6]$
40	-0.066	$u_1[n-1]u_1[n-11]$
44	0.078	$u_1[n-1]u_2[n-1]$
77	0.088	$u_1[n-2]u_2[n-7]$
96	0.020	$u_1[n-3]u_1[n-14]$
101	-0.171	$u_1[n-3]u_2[n-5]$
127	-0.023	$u_1[n-4]u_2[n-6]$
146	-0.138	$u_1[n-5]u_2[n-1]$
147	0.198	$u_1[n-5]u_2[n-2]$
150	0.017	$u_1[n-5]u_2[n-5]$
332	-0.123	$u_2[n-1]u_2[n-2]$
333	0.241	$u_2[n-1]u_2[n-3]$
346	0.079	$u_2[n-2]u_2[n-3]$
422	0.001	$u_2[n-10]u_2[n-11]$

En la tabla anterior la primera columna indica la posición del regresor en la matriz P 547x435, la segunda columna muestra los valores de los parámetros involucrados en el modelo mientras que en la tercera columna se muestran los regresores correspondientes. Como puede observarse de la tabla, el algoritmo MGS, bajo condiciones de ruido, incluye un mayor número de términos y de esta forma oculta la dinámica del sistema descrito por la ecuación IV.33.

IV.5. Conclusiones

El modelo NARMAX representa una alternativa en la identificación de sistemas no-lineales. En nuestro caso específico, el estudio del fenómeno intersensorial, el modelo NARMAX permite una representación del potencial evocado bimodal en función de la actividad bimodal pasada, de las actividades unimodales presentes y pasadas, pero además, del producto de las actividades anteriores. Una ventaja de utilizar el modelo NARMAX es la estimación simultánea de la estructura y los valores de los parámetros del sistema mediante el algoritmo MGS. Sin embargo, como los ejemplos anteriores lo demuestran el algoritmo MGS es sensible al ruido, ya que genera modelos sobreparametrizados. En consecuencia, además del algoritmo MGS es necesario buscar estrategias que minimicen la posibilidad de estimar modelos sobreparametrizados que oculten la dinámica del sistema.

Problemas de Sobreparametrización y Validación del Modelo NARMAX

V.1 Introducción

El modelo NARMAX así como otras representaciones no-lineales tiene la desventaja de considerar un gran número de términos. Por ejemplo, en un modelo NARMAX con una salida, dos entradas y una representación polinomial de segundo orden con $n_y=2$ y $n_u=15$, requiere considerar inicialmente 561 términos. Sin embargo, es importante considerar que un modelo sobreparametrizado tiende a ocultar la dinámica del sistema. El método de Billings y col. permite manejar el problema de sobreparametrización. Sin embargo, el desempeño del algoritmo depende de factores como el ruido presente en las señales adquiridas [60].

Con el propósito de mejorar las técnicas de selección de componentes para modelos no-lineales, Aguirre y Billings han propuesto eliminar términos espurios en base a la definición de los conceptos de agrupamiento ("Cluster") y coeficientes asociados con los grupos [61]. La idea es como sigue: es posible que el comportamiento del error residual, idealmente ruido blanco, una vez que el procedimiento de identificación ha concluido, sea comparable con el comportamiento del error residual de un sub-modelo obtenido eliminando términos que no son necesarios para explicar la dinámica del sistema. Es importante observar que la inclusión de términos espurios puede tener un impacto mínimo en el error residual sin embargo, su inclusión puede influir drásticamente en la interpretación del comportamiento del sistema.

V.2 Concepto de Agrupamiento ("Clustering") en Modelos No-Lineales

Con el propósito de entender el procedimiento para la eliminación de términos espurios,

considere la estructura NARMAX dada por:

$$Y(n) = f(Y(n-1), \dots, Y(n-n_y), U(n-1), \dots, U(n-n_u), e(n-1), \dots, e(n-n_e)) + e(n). \quad (V.1)$$

Como será evidente en los capítulos siguientes, la representación NARX es fundamental para la presente investigación. El modelo NARX, asumiendo una representación polinomial de la función no-lineal en la ecuación V.1 y un modelo de una entrada y una salida (SISO), puede expandirse como [62]:

$$y[n] = \sum_{q=1}^l \sum_{p=0}^q \sum_{n_1=1}^{n_y} \dots \sum_{n_q=1}^{n_u} c_{p,q-p}(n_1, \dots, n_q) \prod_{i=1}^p y[n-n_i] \prod_{i=p+1}^q u[n-n_i], \quad (V.2)$$

en donde l representa el orden del polinomio y $1 \leq q \leq l$. Es importante observar que $q=0$ corresponde al término de *dc* y que los límites superiores de las sumatorias con índices n_i hasta n_q depende de los regresores a ser incluidos en el modelo.

La ecuación V.2 puede considerarse como conjuntos de términos lineales y no-lineales ponderados por un conjunto de coeficientes. Cada conjunto de términos puede asociarse en un grupo ("Cluster") denotado por $\Omega_{y,p,u^{m-p}}$ como:

$$\Omega_{y,p,u^{m-p}} = \left\{ \prod_{i=1}^p y[n-n_i] \prod_{i=p+1}^q u[n-n_i] \mid 1 \leq q \leq l, 0 \leq p \leq q \right\}, \quad (V.3)$$

mientras que los coeficientes del grupo quedan definidos como $\sum_{n_1=1}^{n_y} \dots \sum_{n_q=1}^{n_u} c_{p,q-p}(n_1, \dots, n_q)$. Por lo tanto, el conjunto completo de términos candidatos del modelo NARX se puede escribir como la unión de los diferentes grupos, es decir:

$$\bigcup_{\substack{p=0,\dots,q \\ q=0,\dots,l}} \Omega_{y[n-n_i]^{p,q-p}} = \bigcup_{\substack{p=0,\dots,q \\ q=0,\dots,l}} \left\{ \prod_{i=1}^p y[n-n_i] \prod_{i=p+1}^q u[n-n_i] \mid 1 \leq q \leq l, 0 \leq p \leq q \right\}$$

$$= \left\{ dc \cup \Omega_y \cup \Omega_u \cup \Omega_{y^2} \cup \dots \right\}$$

Aguirre y col. proponen investigar los grupos espurios en el modelo identificado evaluando la magnitud de la suma de los coeficientes de los términos que pertenecen a cada uno de los grupos. La idea es que un grupo con un valor de suma pequeño puede ser eliminado sin afectar el comportamiento del error residual [61]. Se sugiere que los efectos de los términos espurios, desde el punto de vista del comportamiento del error residual, son cancelados dentro de cada grupo espurio. Lo anterior es similar al efecto de cancelación de polos y ceros en un modelo lineal sobreparametrizado.

Una vez que los grupos espurios se han eliminado, el vector de parámetros del modelo puede calcularse nuevamente conservando la estructura inicial concerniente al grado del polinomio, etc, pero excluyendo todas las columnas pertenecientes a los términos espurios en la matriz de regresión P . La eliminación de grupos espurios no evita completamente la generación de modelos sobreparametrizados sin embargo, el proceso de identificación es más robusto si los términos que generan la sobreparametrización provienen de grupos no espurios.

En situaciones prácticas, una vez que los grupos espurios han sido eliminados, es posible que existan términos de compensación al interior de uno o más grupos no espurios. Estos términos de compensación se generan a partir de términos que comparten información con coeficientes relativamente grandes y de signo opuesto, cuya suma tiende a ser pequeña. Los efectos de compensación no se detectan fácilmente utilizando el concepto de agrupamiento pero son evidentes

cuando los parámetros estimados se muestran por grupo.

V.3 Procedimiento de Validación del Modelo NARMAX

Comprobar la estructura del modelo identificado es un paso importante. Una vez que se ha seleccionado un modelo, es esencial probar su "habilidad" para describir los datos observados. En general, los modelos pueden evaluarse por su desempeño en la predicción y en consecuencia, un "buen" modelo se asocia con errores de predicción pequeños. En el procedimiento de comprobar que tan bueno es un modelo ("Model Goodness") es necesario establecer un criterio para definir lo que significa generar un "error pequeño". En el caso de sistemas lineales, el método más aceptado se basa en el cálculo de las correlaciones entre las entradas del sistema y el error residual generado durante el proceso de identificación. La idea es aceptar aquella estructura con valores de funciones de correlación dentro de cierto intervalo pre-establecidos.

Desafortunadamente, los métodos de prueba en sistemas lineales no pueden aplicarse directamente en sistemas no-lineales. Billings y Zhu (1994) proponen hacer más robustas las pruebas basadas en la función de correlación utilizando funciones de correlación de alto orden que involucren las secuencias del error residual, las entradas, y en particular, las salidas [58].

Para establecer el marco teórico de las pruebas no-lineales, es conveniente revisar la formulación de las pruebas basadas en la función de correlación para sistemas lineales. La idea es que el error de predicción de un "buen" modelo lineal debe ser independiente de datos pasados, es decir, si el error de predicción no está correlacionado con datos pasados significa que el modelo identificado capturó toda la información del sistema.

En general, un modelo lineal de tiempo discreto con salida $y[n]$ y entrada $u[n]$ puede expresarse como:

$$\begin{aligned} y[n] &= G(q)u[n] + v[n] \\ v[n] &= H(q)e[n], \end{aligned} \quad (V.4)$$

en donde $v[n]$ representa una perturbación al sistema y

$$\begin{aligned} G(q) &= \sum_{k=1}^{\infty} g[k]q^{-k} \\ H(q) &= \sum_{k=1}^{\infty} h[k]q^{-k} \end{aligned}$$

mientras que el operador de retraso q^{-1} se define como:

$$q^{-1}u[n] = u[n-1].$$

Asumiendo que información acerca de la salida y de la señal de perturbación se conocen al tiempo $n-1$, el valor esperado condicional de $y[n]$ se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \hat{y}[n|n-1] &= G(q)u[n] + \hat{v}[n|n-1] \\ &= G(q)u[n] + [1 - H^{-1}(q)]v[n] \\ &= G(q)u[n] + [1 - H^{-1}(q)][y[n] - G(q)u[n]] \\ &= H^{-1}(q)G(q)u[n] + [1 - H^{-1}(q)]y[n]. \end{aligned} \quad (V.5)$$

La ecuación anterior es conocida como la predicción hacia adelante de un solo paso ("One Step-Ahead Prediction") de la salida del sistema. La desventaja del procedimiento anterior es la ausencia de las propiedades de la perturbación. Con el propósito de tomar en cuenta los efectos de la señal de perturbación, y en consecuencia obtener una estructura de un modelo ARMAX, se introduce un promedio móvil de la secuencia de ruido blanco. En general, la estructura ARMAX, con una sola entrada y una sola salida, puede representarse como:

$$y(n) = f(y(n-1), u(n-1), \varepsilon(n-1)) + \varepsilon(n) \quad (V.6)$$

en donde

$$\begin{aligned} y(n-1) &= [y[n-1], \dots, y[n-n_y]] \\ u(n-1) &= [u[n-1], \dots, u[n-n_u]] \\ \varepsilon(n-1) &= [\varepsilon[n-1], \dots, \varepsilon[n-n_\varepsilon]] \end{aligned}$$

son los vectores correspondientes a la señal de salida, señal de entrada y error residual. Los valores de retraso toman valores desde 1 hasta n_y, n_u y n_ε mientras que $f(\cdot)$ es una función lineal que satisface el principio de superposición y homogeneidad:

$$\begin{aligned} f(y(n-1) + y(n-2), u(n-1) + u(n-2) + \varepsilon(n-1) + \varepsilon(n-2)) &= f(y(n-1), u(n-1), \varepsilon(n-1)) \\ &\quad + f(y(n-2), u(n-2), \varepsilon(n-2)) \\ f(\alpha y(n-1), \alpha u(n-1), \alpha \varepsilon(n-1)) &= \alpha f(y(n-1), u(n-1), \varepsilon(n-1)). \end{aligned}$$

Si el sistema obedece los principios anteriores, la predicción de un paso hacia adelante de la ecuación V.6 puede escribirse utilizando la ecuación V.5 como:

$$\hat{y}[n|\theta] = \frac{B(q)}{C(q)} u[n] + \left[1 - \frac{A(q)}{C(q)}\right] y[n]$$

en donde

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_y} q^{-n_y} \\ B(q) &= 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_u} q^{-n_u} \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_\varepsilon} q^{-n_\varepsilon} \end{aligned}$$

y θ representa los parámetros considerados por el modelo. Definiendo los vectores de regresores y de parámetros como:

$$\begin{aligned}\varphi(n, \Theta) &= [-y[n-1] \dots -y[n-n_y] \ u[n-1] \dots u[n-n_u] \ \varepsilon[n-1, \Theta] \dots \varepsilon[n-n_\varepsilon, \Theta]]' \\ \Theta &= [a_1 \dots a_{n_y} \ b_1 \dots b_{n_u} \ c_1 \dots c_{n_\varepsilon}]'\end{aligned}$$

la predicción hacia adelante de un sólo paso se puede escribir como:

$$\hat{y}(n, \Theta) = \varphi'(n, \Theta)\Theta.$$

La diferencia entre el valor actual de la salida del sistema y su predicción hacia adelante de un sólo paso representa la parte de la salida $y[n]$ que no se puede predecir a partir de valores pasados, a esta diferencia se le conoce como el error de predicción:

$$\varepsilon(n, \Theta) = y[n] - \hat{y}(n, \Theta).$$

Idealmente el error de predicción debe de ser una secuencia no correlacionada con promedio cero y varianza finita. En consecuencia, la prueba de que tan bueno es el modelo reside en verificar la similitud entre la secuencia $\varepsilon[n, \Theta]$ y $e[n]$. Si el proceso de identificación puede incluir toda la información del sistema en la estructura identificada, la función de autocorrelación normalizada del error de predicción y la función de correlación cruzada entre el error de predicción y la entrada, denotadas por $r_{\varepsilon\varepsilon}(\tau)$ y $r_{ue}(\tau)$, deben de cumplir con:

$$\begin{aligned}r_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) &= \frac{\sum_{n=1}^{N-\tau} (\varepsilon[n] - \bar{\varepsilon})(\varepsilon[n-\tau] - \bar{\varepsilon})}{\sum_{n=1}^N (\varepsilon[n] - \bar{\varepsilon})^2}, & \begin{cases} 1, & \tau=0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \\ r_{ue}(\tau) &= \frac{\sum_{n=1}^{N-\tau} (u[n] - \bar{u})(\varepsilon[n-\tau] - \bar{\varepsilon})}{\left[\sum_{n=1}^N (u[n] - \bar{u})^2 \sum_{n=1}^N (\varepsilon[n] - \bar{\varepsilon})^2 \right]^{1/2}} = 0, \quad \forall \tau\end{aligned} \tag{V.7}$$

en donde

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon[n]$$

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u[n].$$

Los estimados de la función de correlación en la ecuación V.7 son asintóticamente normales con media cero y varianza finita para valores grandes de N . Las desviaciones estándar son $1/\sqrt{N}$ y los límites de confianza del 95% se encuentran por lo tanto aproximadamente en $1.95/\sqrt{N}$.

Para el caso lineal MIMO, con m salidas y r entradas, la ecuación V.7 puede escribirse como:

$$r_{\zeta\zeta}(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N (\zeta[n] - \bar{\zeta})(\zeta[n-\tau] - \bar{\zeta})}{\sum_{n=1}^N (\zeta[n] - \bar{\zeta})^2} \quad (V.8)$$

$$r_{\beta\zeta}(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N (\beta[n] - \bar{\beta})(\zeta[n-\tau] - \bar{\zeta})}{\left(\sum_{n=1}^N (\beta[n] - \bar{\beta})^2 \sum_{n=1}^N (\zeta[n] - \bar{\zeta})^2 \right)^{1/2}}$$

en donde $\zeta[n] = \varepsilon_1[n] + \dots + \varepsilon_m[n]$ y $\beta[n] = u_1[n] + \dots + u_r[n]$.

En resumen, las pruebas lineales se enfocan a verificar la dependencia de $\varepsilon[n]$ con la información pasada de las señales de entrada. La función $r_{\zeta\zeta}(\tau)$ se utiliza para detectar, en la señal de ruido residual $\varepsilon[n]$, términos retrasados de ruidos como por ejemplo $\varepsilon_1[n-j]$ mientras que la función $r_{\beta\zeta}(\tau)$ se aplica para detectar términos retrasados de la señal de entrada como $u_1[n-j]$. Ambas funciones de correlación indican que información de la señal de salida retrasada permanece en

$\varepsilon[n]$, debido a que salidas retrasadas están correlacionadas con las señales de entrada.

Para el caso de sistemas no-lineales las pruebas no son tan simples como en el caso lineal debido a que pueden existir términos no lineales en el error residual y las correlaciones definidas en la ecuación V.8 no son suficientes para probar que tan bueno es el modelo. Billings y Zhu han propuesto la extensión de las pruebas de correlación anteriores utilizando estadística de alto orden. Las pruebas incluyen los vectores correspondientes a la secuencia de entrada, salida y errores residuales del sistema identificado. Las pruebas para modelos no-lineales se llevan a efecto mediante un procedimiento jerárquico que verifican el funcionamiento global y local del modelo. Las pruebas globales verifican la correlación de todas las entradas de los sub-modelos, salidas y vectores residuales mientras que las pruebas locales verifican la correlación entre las entradas de los submodelos, salidas y vectores residuales. Las medidas de correlación en las Tablas V.1 y V.2 consideran un modelo NARMAX con m salidas y r entradas. La Tabla V.1 muestra las mediciones globales de correlación de alto orden en forma normalizada en donde se asume que los procesos son ergódicos y de longitud finita. Las medidas de correlación locales se incluyen en la Tabla V.2.

Las variables utilizadas en la Tabla V.1 se definen como:

$$\begin{aligned}\xi[n] &= \varepsilon_1^2[n] + \dots + \varepsilon_m^2[n] \\ \eta[n] &= y_1 \varepsilon_1[n] + \dots + y_m \varepsilon_m[n] \\ \vartheta[n] &= u_1^2[n] + \dots + u_r^2[n],\end{aligned}$$

con los valores promedio dados por:

$$\bar{\xi}[n] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon_1^2[n] + \dots + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon_m^2[n].$$

Tabla V.1. Pruebas de correlación global para modelos no-lineales.	
Medida de Correlación	Indica términos retrasados no-lineales de:
$r_{\xi\eta}(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N (\xi[n] - \bar{\xi})(\eta[n-\tau] - \bar{\eta})}{\left(\sum_{n=1}^N (\xi[n] - \bar{\xi})^2 \sum_{n=1}^N (\eta[n] - \bar{\eta})^2 \right)^{1/2}}$	términos de salida y de ruido
$r_{\theta\eta}(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N (\theta[n] - \bar{\theta})(\eta[n-\tau] - \bar{\eta})}{\left(\sum_{n=1}^N (\theta[n] - \bar{\theta})^2 \sum_{n=1}^N (\eta[n] - \bar{\eta})^2 \right)^{1/2}}$	términos de la señal de entrada

En forma ideal, las funciones de correlación de la Tabla V.1, cuando el modelo es una representación adecuada del sistema, deben cumplir con:

$$r_{\xi,\eta}(\tau) = \begin{cases} k, & \tau=0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases}$$

$$r_{\theta,\eta}(\tau) = 0, \quad \forall \tau$$

en donde k es una constante definida en [60].

Las variables en la Tabla V.2 se definen como:

$$\varepsilon^2[n] = [\varepsilon_1^2[n] \dots \varepsilon_m^2[n]]'$$

$$\eta[n] = [y_1 \varepsilon_1[n] \dots y_m \varepsilon_m[n]]'$$

$$u^2[n] = [u_1^2[n] \dots u_r^2[n]]'$$

Si el modelo es una representación válida del sistema las funciones de correlación de la Tabla V.2 deben de cumplir con:

$$R_{\xi,\eta}(\tau) = \begin{cases} K_{m \times m} & \tau=0 \\ 0_{m \times m} & \tau \neq 0 \end{cases}$$

$$R_{\theta,\eta}(\tau) = 0_{r \times m} \quad \forall \tau$$

en donde K es una matriz diagonal con elementos constantes definidos en [60].

Tabla V.2. Pruebas locales de correlación para modelos no-lineales.	
Medida de Correlación	Indica términos retrasados no lineales de :
$R_{\varepsilon^2,\eta}(\tau) = \begin{bmatrix} r_{\varepsilon_1^2\eta_1}(\tau) & \dots & r_{\varepsilon_1^2\eta_q}(\tau) \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{\varepsilon_m^2\eta_1}(\tau) & \dots & r_{\varepsilon_m^2\eta_q}(\tau) \end{bmatrix}$	términos de error y señal de salida como $e_1[n-j]e_1[n-i]$ y $y_1[n-j]u_1[n-i]$
$R_{u^2,\eta}(\tau) = \begin{bmatrix} r_{u_1^2\eta_1}(\tau) & \dots & r_{u_1^2\eta_q}(\tau) \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{u_m^2\eta_1}(\tau) & \dots & r_{u_m^2\eta_q}(\tau) \end{bmatrix}$	términos de la señal de entrada como $u_1[n-j]e_1[n-i]$ y $u_1[n-j]u_2[n-i]$

V.4. Resultados del Agrupamiento y Pruebas de Validación en Modelos NARMAX con Datos Sintetizados

Un problema importante de las técnicas de identificación lineales y no-lineales es la generación de modelos sobreparametrizados. El algoritmo MGS no es la excepción. Los resultados en la estimación paramétrica del modelo definido en la ecuación IV.33 demuestran que la aplicación del algoritmo MGS incluye regresores que originalmente no están definidos en el modelo. En consecuencia, es necesario utilizar estrategias para disminuir la cantidad de términos espurios. En esta sección se aplican los conceptos de agrupamiento y pruebas de validación del modelo para sistemas

no-lineales al sistema propuesto en el capítulo IV. Es importante señalar, que el procedimiento propuesto para obtener modelos no-sobrep parametrizados para el potencial evocado bimodal, en términos de una representación NARX, se explica en detalle en el siguiente capítulo. En este capítulo el agrupamiento y pruebas de validación se utilizan para demostrar su importancia en la selección de la estructura mínima del modelo.

Como se reporta en tabla IV.1, el algoritmo MGS incluye 6 términos lineales y 16 términos no-lineales en comparación con 4 términos lineales y 3 términos no-lineales del modelo original. Formando grupos de acuerdo con la ecuación V.3, y considerando que $n_v=0$, $n_u=14$, $n_e=0$ y $l=2$ para este ejemplo, se tienen cinco grupos ("Clusters") conformados por los regresores:

$$\begin{aligned}
 \text{Grupo 002} &= \{u_1[n-1], \dots, u_1[n-n_{u_1}]\} \\
 \text{Grupo 003} &= \{u_2[n-1], \dots, u_2[n-n_{u_2}]\} \\
 \text{Grupo 022} &= \{u_1[n-1]u_1[n-1], \dots, u_1[n-n_{u_1}]u_1[n-n_{u_1}]\} \\
 \text{Grupo 023} &= \{u_1[n-1]u_2[n-1], \dots, u_1[n-n_{u_1}]u_2[n-n_{u_2}]\} \\
 \text{Grupo 033} &= \{u_2[n-1]u_2[n-1], \dots, u_2[n-n_{u_2}]u_2[n-n_{u_2}]\}.
 \end{aligned} \tag{V.9}$$

La suma de los parámetros correspondientes a los regresores de cada grupo, de acuerdo a la ecuación V.2 y a $\sum_{n_1=1}^{n_v} \dots \sum_{n_q=1}^{n_u} c_{p,q-p}(n_1, \dots, n_q)$, es decir los coeficientes del grupo, corresponden a los valores de la tercera columna de la Tabla V.3. Como puede observarse de los valores en la Tabla, ninguno de los grupos presenta una suma de parámetros despreciable como para eliminar el grupo completo de regresores. Sin embargo, si se despliegan los valores de los parámetros correspondiente a cada regresor por grupo, como se muestra en la segunda columna de la Tabla V.3, se observa que algunos regresores participan con un valor insignificante de sus parámetros. Por lo tanto, se puede

efectuar una eliminación de regresores espurios dentro de cada grupo. Por ejemplo, en una primera

Tabla V.3. Resultados del modelo NARMAX.

Grupo	θ	Suma de coeficientes del grupo	Regresor
002	1.122	1.885	$u_1[n-2]$
	0.571		$u_1[n-5]$
	0.193		$u_1[n-9]$
003	0.531	0.9053	$u_2[n-1]$
	-0.067		$u_2[n-5]$
	0.441		$u_2[n-8]$
022	0.044	0.6991	$u_1[n-1]u_1[n-2]$
	0.391		$u_1[n-1]u_1[n-5]$
	0.310		$u_1[n-1]u_1[n-6]$
	-0.066		$u_1[n-1]u_1[n-11]$
	0.020		$u_1[n-3]u_1[n-14]$
023	0.078	0.04865	$u_1[n-1]u_2[n-1]$
	0.088		$u_1[n-2]u_2[n-7]$
	-0.171		$u_1[n-3]u_2[n-5]$
	-0.023		$u_1[n-4]u_2[n-6]$
	-0.138		$u_1[n-5]u_2[n-1]$
	0.198		$u_1[n-5]u_2[n-2]$
	0.017		$u_1[n-5]u_2[n-5]$
033	-0.123	0.1984	$u_2[n-1]u_2[n-2]$
	0.241		$u_2[n-1]u_2[n-3]$
	0.079		$u_2[n-2]u_2[n-3]$
	0.001		$u_2[n-10]u_2[n-11]$

iteración el regresor $u_2[n-10]u_2[n-11]$, perteneciente al grupo 033, presenta el parámetro asociado θ con el valor más pequeño del grupo. Este regresor es un candidato a ser eliminado. El procedimiento

de eliminar regresores dentro de un cluster se repite hasta que no existan regresores insignificantes en todos los grupos. Al final del procedimiento la estructura del modelo identificado queda definida como:

$$y[n] = 1.242u_1[n-2] + 0.352u_1[n-5] + 0.252u_1[n-9] + 0.47u_2[n-1] + 0.451u_2[n-8] + 0.704u_1[n-1]u_1[n-5] + 0.197u_2[n-2]u_2[n-3] + 0.047u_1[n-1]u_2[n-1]. \quad (V.10)$$

Como puede observarse de la ecuación V.10, el modelo identificado después de eliminar términos espurios dentro de cada grupo se aproxima al modelo original. El modelo identificado incluye regresores con retrasos muy cercanos a los regresores del modelo original.

Como se observa en ecuación V.10, la estructura identificada presenta 8 regresores en lugar de los 7 originales incluidos en el modelo del ejemplo. Es decir, el problema de sobreparametrización puede permanecer aún y cuando se apliquen los conceptos de agrupamiento. Como se discutirá en el capítulo VI es posible utilizar una variable del algoritmo MGS para reducir la cantidad de regresores irrelevantes. Siguiendo este procedimiento se obtiene finalmente el modelo dado por:

$$y[n] = 0.985u_1[n-2] + 0.855u_1[n-5] + 0.471u_2[n-1] + 0.451u_2[n-8] + 0.706u_1[n-1]u_1[n-5] + 0.197u_2[n-2]u_2[n-3] + 0.045u_1[n-1]u_2[n-1]. \quad (V.11)$$

Una vez que se ha identificado una estructura para el sistema bajo análisis, es conveniente realizar las pruebas de correlación que se reportan en las Tablas V.1 y V.2. En las figuras V.1 (a) y (b) se muestran los resultados de las pruebas de correlación globales mientras que en las figuras V.1 (c)-(e) se muestran las pruebas locales para el modelo identificado de la ecuación V.11. Como puede observarse, todas las funciones de correlación se encuentran dentro de los límites del 95% de confianza.

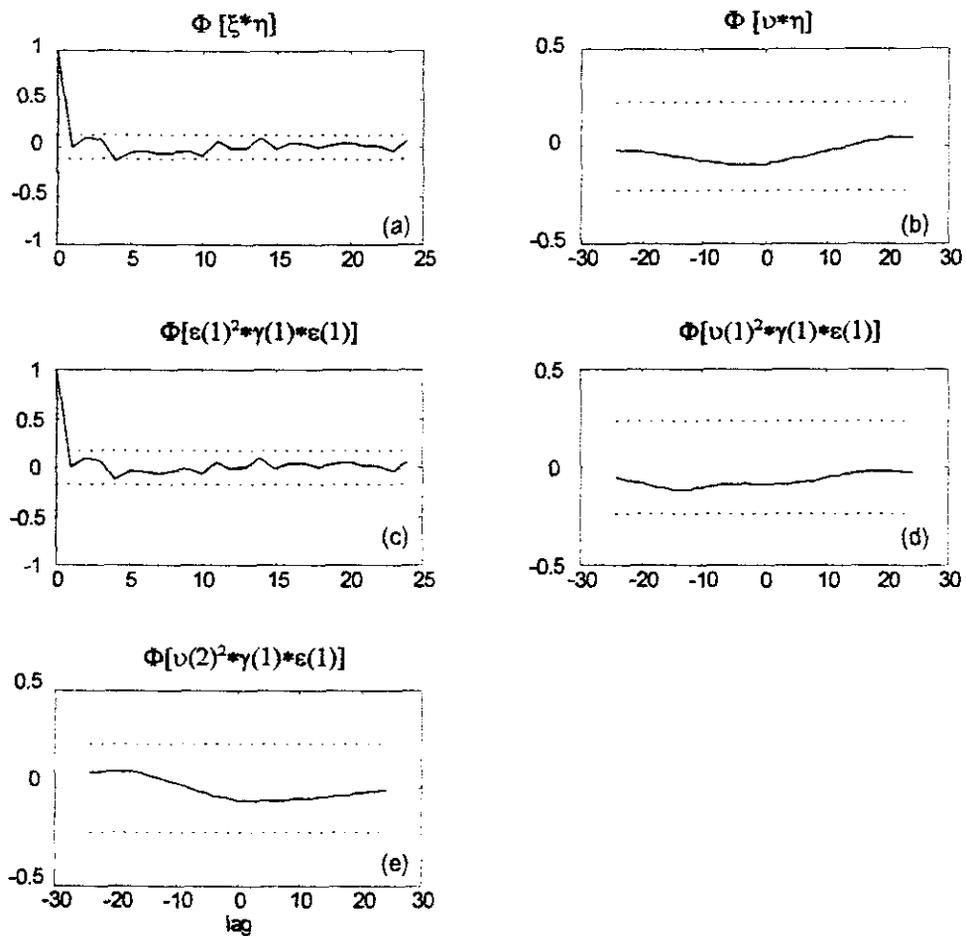


Figura V.1. Pruebas de correlación de alto orden en la validación del sistema no-lineal.

V.5. Conclusiones

Un problema relevante a evitar en el proceso de identificación es la generación de modelos sobreparametrizados. Una de las estrategias que se han propuesto, para el caso particular del modelo NARMAX, es el agrupar los coeficientes con el propósito de eliminar aquellos que no sean significativos para el modelo. El agrupamiento elimina un conjunto completo de regresores si la suma de sus parámetros asociados es insignificante. Además, es posible eliminar regresores dentro de cada

uno de los grupos generados. Es importante señalar que el procedimiento de agrupar los coeficientes reduce pero no elimina la posibilidad de generar terminos espurios.

Formulación Matemática del Fenómeno Intersensorial y Metodología Propuesta para el Modelado del Potencial Evocado Bimodal

VI.I Introducción

Las modalidades sensoriales generalmente se han estudiado en forma independiente a pesar de que la información que se recibe en una vía sensorial puede influir la información que se recibe en otra vía sensorial. Una de las definiciones importantes en el campo de la interacción sensorial y relevante para el presente trabajo es la propuesta por Welch quien establece que interacción sensorial es la situación en donde la percepción de un evento, medido en términos de una vía sensorial, se modifica en alguna forma por la actividad concurrente en otra u otras vías sensoriales. Sin embargo, a pesar de la claridad en la definición, la evaluación y análisis del fenómeno intersensorial ha permanecido como una área de investigación abierta.

La presencia del fenómeno intersensorial se ha evidenciado mediante tiempos de reacción más cortos en la detección de estímulos relevantes. Diferentes experimentos han mostrado el decremento en los tiempos de reacción cuando información en otra vía u otras vías sensoriales precede o se presenta en forma simultánea con el estímulo relevante. Sin embargo, el tiempo de reacción es una medida global y no proporciona información acerca del tipo de relación entre las vías sensoriales involucradas en la percepción de un evento.

En estimulación multisensorial, surgen preguntas acerca del lugar y el tipo de interacciones sensoriales. Es un hecho que no existe consenso acerca de los mecanismos involucrados en la

percepción de un evento en una vía sensorial cuando existe estimulación concurrente en otras modalidades sensoriales.

Los potenciales evocados se han considerado como una herramienta adecuada para entender los procesos mentales y las diferentes etapas de información generadas bajo diversas condiciones de estimulación. En términos de potenciales evocados, generalmente se asume que se presenta el fenómeno intersensorial cuando el potencial evocado multisensorial sintetizado difiere del potencial evocado multisensorial adquirido. Debido a que el potencial evocado sintetizado se define como la suma aritmética de las actividades unimodales, este concepto de interacción no considera modelos teóricos más complejos entre las actividades eléctricas unimodales y multimodales.

En las siguientes secciones, el término "bimodal" se utiliza para denotar la respuesta del cerebro cuando se presenta en forma simultánea estimulación visual y auditiva mientras que el término "unimodal" denota la respuesta a cada uno de los estímulos.

En términos de la teoría de sistemas, la descripción más simple de la salida de un sistema lineal es la suma de las señales de entrada. Sin embargo, es posible que un modelo lineal más complejo pueda representar a la función de transferencia en estimulación multisensorial, aún reflejando procesamiento independiente de la información en las vías sensoriales. Históricamente, la razón de utilizar estructuras lineales en la descripción de la dinámica de un proceso es el hecho de que los resultados de modelos no-lineales son limitados y generalmente de interés teórico. Sin embargo, es evidente que la mayoría de los procesos reales son más complejos y un modelo lineal únicamente genera una aproximación de sus dinámicas. En el campo de los potenciales evocados se ha utilizado

técnicas lineales para analizar las actividades unimodales y bimodales mientras que el uso de modelos no-lineales permanece como una área abierta a la investigación.

Este capítulo se enfoca al modelado de la información electrofisiológica obtenida cuando se utiliza estimulación visual y auditiva en forma concurrente. El procedimiento inicia con la descripción matemática de un modelo no-lineal que incluye las posibles interacciones entre las respuestas unimodales de las dos trayectorias sensoriales involucradas. En el modelo propuesto el potencial evocado bimodal no se considera como la simple superposición de los dos potenciales evocados unimodales, por hipótesis, se considera el potencial evocado bimodal como la suma de información modificada y combinada de los potenciales auditivo y visual. Las versiones modificadas de la información unimodal, incluyendo cambios de amplitud y corrimientos de latencia, forman parte de un sistema lineal. Por otra parte, la combinación de la información unimodal, involucrando productos de la información de una sola vía sensorial así como productos cruzados de la información entre vías, generan la representación no-lineal del sistema. En consecuencia, la definición del fenómeno de interacción sensorial es modificada en el siguiente sentido: el fenómeno ocurre únicamente cuando es necesario expresar el potencial evocado bimodal como una función no-lineal de los potenciales evocados unimodales. Es decir, la descripción del sistema incluye productos cruzados de las actividades visuales y auditivas. Mediante esta propuesta será posible cuantificar las contribuciones lineales y no-lineales de las respuestas unimodales en la formación del potencial evocado bimodal. Para este propósito, en forma adicional a la extensión del concepto del fenómeno intersensorial, se propone y se define un índice que permite evaluar la contribución no-lineal. Dado que la selección de la estructura del modelo representa la etapa más difícil en el proceso de identificación de un sistema,

en este trabajo también se propone un procedimiento para evitar modelos no-lineales con estructuras sobreparametrizadas.

VI.2. Modelo del Potencial Evocado Bimodal

La representación tradicional para sistemas no-lineales ha sido la serie de Volterra. Sin embargo, a pesar de su popularidad teórica, el filtro de Volterra tiene una aplicación limitada en problemas prácticos debido a que no existe un algoritmo que evalúe la estructura del modelo. El modelo no-lineal autorregresivo de promedio móvil con entradas exógenas (NARMAX) propuesto por Billings y col. representa una buena alternativa en la representación de un proceso no-lineal. En la descripción NARMAX la estructura del sistema es desconocida y es necesario aproximarla mediante funciones no-lineales conocidas como "wavelets", funciones de base radial, polinomios, etc. En la presente investigación, el potencial evocado bimodal se describe mediante una formulación matemática no-lineal utilizando funciones polinomiales. En la selección de la estructura se utiliza el algoritmo "forward-regression orthogonal" utilizando el procedimiento de ortogonalización de Gram-Schmidt modificado (MGS).

VI.3. Formulación Matemática No-Lineal del Fenómeno de Interacción entre las Vías Sensoriales Visual y Auditiva

El modelo del potencial evocado bimodal, utilizando la versión NARX del NARMAX, permite establecer un marco teórico para cuantificar la importancia de la contribución no-lineal de la información unimodal y en consecuencia, la posibilidad de extender el concepto del fenómeno intersensorial y generar algunas hipótesis acerca de este fenómeno.

En el modelo de la actividad bimodal adquirida como una función no-lineal de las actividades visual y auditivas adquiridas considere la siguiente ecuación:

$$y_B[n] = F\{y_B[n-1], \dots, y_B[n-n_{y_B}], u_A[n-1], \dots, u_A[n-n_{u_A}], u_V[n-1], \dots, u_V[n-n_{u_V}]\} + e[n], \quad (\text{VI.1})$$

en donde n denota el tiempo discreto, $y_B[n]$ representa el potencial evocado bimodal, $u_A[n]$ denota el potencial evocado auditivo y $u_V[n]$ el potencial evocado visual. $F[\cdot]$ es alguna función no-lineal mientras que n_{y_B} , n_{u_A} y n_{u_V} denotan el retraso para las actividades eléctricas bimodal y unimodales. El proceso $e[n]$, un proceso de media cero, representa el error de predicción.

Considerando que la función no-lineal $F[\cdot]$ se aproxima mediante una expansión polinomial y definiendo los regresores como:

$$\begin{aligned} x_1[n] &= y_B[n-1], & x_2[n] &= y_B[n-2], \dots, & x_{n_y}[n] &= y_B[n-n_{y_B}], \\ x_{n_y+1}[n] &= u_A[n-1], & x_{n_y+2}[n] &= u_A[n-2], \dots, & x_{n_y+n_{u_A}}[n] &= u_A[n-n_{u_A}], \\ x_{n_y+n_{u_A}+1}[n] &= u_V[n-1], & x_{n_y+n_{u_A}+2}[n] &= u_V[n-2], \dots, & x_{n_y+n_{u_A}+n_{u_V}}[n] &= u_V[n-n_{u_V}] \end{aligned} \quad (\text{VI.2})$$

el potencial evocado bimodal en VI.1 se puede expresar como:

$$y_B[n] = \theta_0 + \sum_{i_1=1}^n \theta_{i_1} x_{i_1}[n] + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=i_1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}[n] x_{i_2}[n] + \dots + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_l=i_{l-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_l} x_{i_1}[n] \dots x_{i_l}[n] + e[n], \quad (\text{VI.3})$$

en donde l representa el grado del polinomio y $\theta_{i_1 \dots i_l}$ son los parámetros de la estructura a ser estimados. De la ecuación anterior, $l=1$ proporciona una descripción lineal mientras que $l \geq 2$ incorpora productos cruzados entre la información visual y auditiva. Los parámetros θ_0 y θ_{i_1} están asociados con los n términos lineales definidos en la ecuación VI.3. El número de términos lineales involucrados en el modelo NARX depende del número máximo de retrasos considerados en la

información de entrada y salida del sistema, es decir, $n = n_{y_B} + n_{u_A} + n_{u_I}$, representa el número de términos lineales, sin considerar el término de *dc*.

Definiendo la matriz Φ y el vector de parámetros Θ como:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & x_1(k-N) & x_2(k-N) & \dots & x_{i_1}(k-N) & \dots & x_{i_1}(k-N)x_{i_2}(k-N) & \dots & x_{i_1}(k-N)*\dots*x_{i_l}(k-N) \\ \dots & \dots \\ 1 & x_1(k) & x_2(k) & \dots & x_{i_1}(k) & \dots & x_{i_1}(k)x_{i_2}(k) & \dots & x_{i_1}(k)*\dots*x_{i_l}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{VI.4})$$

$$\Theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{i_1} \ \dots \ \theta_{i_1 i_2} \ \dots \ \theta_{i_1 \dots i_l}]^t, \quad (\text{VI.5})$$

la ecuación VI.3, para los tiempos 1, 2, ..., N, puede escribirse como el modelo de regresión lineal:

$$y_B = \Phi\Theta + e, \quad (\text{VI.6})$$

en donde $y_B = [y_B[n-N] \ \dots \ y_B[n]]^t$ y $e = [e[n-N] \ \dots \ e[n]]^t$. Las columnas de Φ , llamadas regresores, son formadas por los monomios, información sensorial unimodal y bimodal, definidos en la ecuación VI.2 así como por sus productos cruzados. Los regresores relevantes en ecuación VI.6 no se conocen a priori y por lo tanto, durante el proceso de identificación es deseable seleccionar un subconjunto, Φ_s , del número total de regresores. En consecuencia, el modelo del potencial evocado bimodal puede establecerse como un problema combinado de selección de la estructura del modelo y de estimación paramétrica para minimizar la suma de errores cuadráticos $\|y_B - \Phi_s \hat{\Theta}_s\|$, en donde $\|\cdot\|$ denota la norma Euclídeana.

En la selección del regresor más significativo para el modelo, el algoritmo "forward-regression

orthogonal" elige, en la iteración k -ésima, el regresor de la columna i -ésima de la matriz Φ , ϕ_i^k , que produce el valor más grande de la razón de reducción del error $[e_{rr}]_k^i = (\hat{g}_k^i)^2 \langle \phi_i^{k-1}, \phi_i^{k-1} \rangle / \langle y_B, y_B \rangle$, en donde $\langle \cdot \rangle$ representa el producto interno. Lo anterior genera una reducción importante del error cuadrático. La variable $\hat{g}_k^i = \langle \phi_i^{k-1}, y^{k-1} \rangle / \langle \phi_i^{k-1}, \phi_i^{k-1} \rangle$, en donde $y^k = y^{k-1} - g_k \omega_k$, ω_k representa el k -ésimo regresor ortogonalizado y $y^0 = y_B$. Nuevos regresores se incluyen en el modelo hasta que el Criterio de Akaike (AIC) presente un mínimo.

La salida del algoritmo es el vector de parámetros Θ_s , correspondiente a los regresores seleccionados que conforman la matriz Φ_s . Debido a que el valor de $[e_{rr}]_k^i$ se asocia con la relevancia del regresor, esta variable será relevante para evitar obtener estructuras sobreparametrizadas.

En esta investigación se propone que el fenómeno intersensorial se presenta cuando el potencial evocado bimodal se expresa como una función matemática no-lineal de los potenciales evocados unimodales, es decir, en la descripción del sistema dada por la ecuación VI.3 existen productos cruzados de las actividades eléctricas visual y auditiva. A partir de la ecuación VI.3 la actividad intersensorial puede aislarse y expresarse matemáticamente como:

$$y[n]_{Intersensorial} = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=i_1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}[n] x_{i_2}[n] + \dots + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_l=i_{l-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_l} x_{i_1}[n] \dots x_{i_l}[n] - y[n]_{Intrasensorial} \quad (VI.7)$$

en donde $y[n]_{Intrasensorial}$ agrupa los productos no-lineales que contienen información que proviene de una sola vía sensorial. Estos productos no se consideran en la descripción del fenómeno intersensorial y se describen a partir de la ecuación VI.3 como:

$$\begin{aligned}
y[n]_{Intrasensorial} = & \sum_{i_1=1}^{n_{yR}} \dots \sum_{i_j=i_{j-1}}^{n_{yR}} \theta_{i_1 \dots i_j} x_{i_1}[n] \dots x_{i_j}[n] + \sum_{i_1=n_{yR}-1}^{n_{yR}+n_{yA}} \dots \sum_{i_j=i_{j-1}}^{n_{yR}+n_{yA}} \theta_{i_1 \dots i_j} x_{i_1}[n] \dots x_{i_j}[n] \\
& + \sum_{i_1=n_{yR}+n_{yA}+1}^n \dots \sum_{i_j=i_{j-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_j} x_{i_1}[n] \dots x_{i_j}[n].
\end{aligned} \tag{VI.8}$$

Así también en este trabajo se define, a partir de las contribuciones lineales e intrasensoriales, el modelo de suma de energía (ESM) dado por la ecuación:

$$y[n]_{ESM} \approx \left[\theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i[n] \right]_{Linear} + y[n]_{Intrasensorial} \tag{VI.9}$$

que indica la contribución de vías sensoriales de forma independiente, ya sea lineal o no-lineal.

Una vez definidas las actividades lineal, intrasensorial e intersensorial, es posible establecer una figura de mérito para evaluar el fenómeno de interacción sensorial. El índice propuesto de contribución de actividad no-lineal se puede establecer a partir de las ecuaciones VI.3 y VI.7 como la contribución no-lineal intersensorial normalizada por la energía total del modelo, es decir:

$$NLII = \frac{E \left\{ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=i_1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}[n] x_{i_2}[n] + \dots + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_j=i_{j-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_j} x_{i_1}[n] \dots x_{i_j}[n] - y[n]_{Intra} \right\}_{Inter}}{E \left\{ \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i[n] \right\}_{Linear} + E \left\{ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=i_1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}[n] x_{i_2}[n] + \dots + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_j=i_{j-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_j} x_{i_1}[n] \dots x_{i_j}[n] \right\}_{Intra + Inter}} \tag{VI.10}$$

en donde $E\{\cdot\} = \sum_k |\cdot|^2$ denota el operador de energía. Es importante señalar que el numerador de la ecuación VI.10 sólo considera productos cruzados de las actividades sensoriales mientras que el denominador se forma por todos los regresores lineales o no-lineales incluidos en el modelo

identificado.

VI.4. Problemas de Sobre-Parametrización en el Modelo del Potencial Evocado Bimodal

El algoritmo “forward-regression orthogonal”, en combinación con el criterio de Akaike, determina la estructura del modelo y la estimación paramétrica, sin embargo, es posible generar modelos sobre-parametrizados que oculten la dinámica del fenómeno de interacción sensorial. Con el propósito de eliminar regresores espurios en la estructura del modelo identificado del potencial evocado bimodal, se agrupan los términos asociados con información similar, es decir, información bimodal, visual, auditiva o actividad de productos cruzados. La relevancia de cada uno de los grupos se evalúa en base a la suma de los parámetros θ que los constituyen. Los diferentes grupos pueden definirse si la ecuación VI.3 se reescribe de la forma:

$$y_B[n] = \sum_{q=1}^l \sum_{p=0}^q \sum_{j=0}^{q-p} \sum_{n_1=1}^{n_{y_B}} \cdots \sum_{n_q=1}^{n_u} c_{p,j,r}(n_1, \dots, n_q) \prod_{i=1}^p y_B[n-n_i] \prod_{i=p+1}^{p+j} u_A[n-n_i] \prod_{i=p+j+1}^q u_V[n-n_i], \quad (\text{VI.11})$$

en donde la variable l representa el orden del polinomio, $q=p+j+r$, y los límites superiores de las sumatorias sobre los índices n_i hasta n_q dependen de la actividad unimodal o bimodal que se incluye.

La variable n_u representa el retraso máximo de la actividad visual o auditiva. Los términos $c_{p,j,r}(n_1, \dots, n_q)$ se relacionan con los parámetros $\theta_{i_1 \dots i_l}$ de la forma siguiente: asumiendo un modelo no-lineal de segundo orden, es decir, $l=2$ y considerando $n_u = n_{u_A} = n_{u_V}$, la ecuación VI.11 involucra diferentes términos en $y_B[n]$, $u_A[n]$, $u_V[n]$, o productos de estas variables dependiendo de los valores de q, p, j y r . Si $q=l$ en VI.11, p, j , y r toman los valores de 0 ó 1 produciendo los siguientes términos:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n_1=1}^{n_{u_v}} c_{001}(n_1) u_v(k-n_1), \quad q=1, p=0, j=0, r=1 \\
& \sum_{n_1=1}^{n_{u_A}} c_{010}(n_1) u_A(k-n_1), \quad q=1, p=0, j=1, r=0 \\
& \sum_{n_1=1}^{n_y} c_{100}(n_1) y_B(k-n_1), \quad q=1, p=1, j=0, r=0.
\end{aligned} \tag{VI.12}$$

Considerando los términos anteriores la descripción matemática del potencial bimodal se escribe como:

$$y_{B_{\text{linear}}}(k) = \sum_{n_1=1}^{n_{u_v}} c_{001}(n_1) u_v(k-n_1) + \sum_{n_1=1}^{n_{u_A}} c_{010}(n_1) u_A(k-n_1) + \sum_{n_1=1}^{n_y} c_{100}(n_1) y_B(k-n_1). \tag{VI.13}$$

Como puede observarse, todos los términos lineales en la ecuación VI.3, $\sum_{i_1=1}^n \theta_{i_1} x_{i_1}(k)$, con parámetros θ_{i_1} , $i_1=1, \dots, n$ y $n=n_{u_v}+n_{u_A}+n_{y_B}$ se incluyen en los tres términos de la ecuación VI.13 pero agrupados por actividad, es decir, actividad visual, auditiva o bimodal. Los diferentes términos de la ecuación VI.13 forman los grupos Ω_{u_v} , Ω_{u_A} y Ω_{y_B} , respectivamente. En consecuencia, desde $i_1=1, \dots, n_{y_B}$, $\theta_{i_1}=c_{100}(n_1)$, con $n_1=1, \dots, n_{y_B}$; desde $i_1=n_{y_B}+1, \dots, n_{y_B}+n_{u_A}$, $\theta_{i_1}=c_{010}(n_1)$, con $n_1=1, \dots, n_{u_A}$; y desde $i_1=n_{y_B}+n_{u_A}+1, \dots, n_{y_B}+n_{u_A}+n_{u_v}$, $\theta_{i_1}=c_{001}(n_1)$, con $n_1=1, \dots, n_{u_v}$.

Siguiendo un procedimiento similar para $q=2$, los términos no-lineales producidos por la ecuación VI.11 están dados por la ecuación VI.14. Los grupos incluidos en la ecuación VI.14 son, de arriba hacia abajo, $\Omega_{u_v^2}$, $\Omega_{u_v u_v}$, $\Omega_{u_A^2}$, $\Omega_{y_B u_v}$, $\Omega_{y_B u_A}$ y $\Omega_{y_B^2}$, respectivamente. Los términos no-lineales

de segundo orden en la ecuación VI.3, $\sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k)$, con parámetros $\theta_{i_1 i_2}$ se agrupan por actividad en la ecuación VI.14. Por ejemplo, los términos no-lineales de segundo orden $y_B(k - n_1) y_B(k - n_2)$ con coeficientes $c_{200}(n_1, n_2)$ en VI.14 corresponde a $\theta_{i_1 i_2}$ con $i_1 = 1, \dots, n_{y_B}$ y $i_2 = i_1, \dots, n_{y_B}$ mientras que los términos $y_B(k - n_1) u_A(k - n_2)$ con coeficientes $c_{110}(n_1, n_2)$ corresponden a los parámetros $\theta_{i_1 i_2}$ con $i_1 = 1, \dots, n_{y_B}$ y $i_2 = n_{y_B} + 1, \dots, n_{y_B} + n_{u_A}$. El procedimiento puede extenderse para obtener en general la correspondencia entre los coeficientes $c_{p,j,r}(n_1, \dots, n_q)$ y los parámetros $\theta_{i_1 \dots i_p}$.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n_1=1}^{n_{u_V}} \sum_{n_2=1}^{n_{u_V}} c_{002}(n_1, n_2) u_V(k - n_1) u_V(k - n_2), & q = 2, p = 0, j = 0, r = 2 \\
 & \sum_{n_1=1}^{n_{u_A}} \sum_{n_2=1}^{n_{u_V}} c_{011}(n_1, n_2) u_A(k - n_1) u_V(k - n_2), & q = 2, p = 0, j = 1, r = 1 \\
 & \sum_{n_1=1}^{n_{u_A}} \sum_{n_2=1}^{n_{u_A}} c_{020}(n_1, n_2) u_A(k - n_1) u_A(k - n_2), & q = 2, p = 0, j = 2, r = 0 \\
 & \sum_{n_1=1}^{n_y} \sum_{n_2=1}^{n_{u_V}} c_{101}(n_1, n_2) y_B(k - n_1) u_V(k - n_2), & q = 2, p = 1, j = 0, r = 1 \\
 & \sum_{n_1=1}^{n_{y_B}} \sum_{n_2=1}^{n_{u_A}} c_{110}(n_1, n_2) y_B(k - n_1) u_A(k - n_2), & q = 2, p = 1, j = 1, r = 0 \\
 & \sum_{n_1=1}^{n_{y_B}} \sum_{n_2=1}^{n_{y_B}} c_{200}(n_1, n_2) y_B(k - n_1) y_B(k - n_2), & q = 2, p = 2, j = 0, r = 0.
 \end{aligned} \tag{VI.14}$$

La ecuación VI.11 puede considerarse como grupos de regresores lineales y no-lineales "ponderados" por un conjunto de coeficientes. Cada uno de los grupos de regresores puede ser asociado con un grupo denotado por $\Omega_{y_B^p u_A^j u_V^r}$ como:

$$\Omega_{y_B^p u_A^j u_C^r} = \left\{ \prod_{i=1}^p y_B(k-n_i) \prod_{i=p+1}^{p+1} u_A(k-n_i) \prod_{i=p+j+1}^q u_C(k-n_i) \mid 1 \leq q \leq l, 0 \leq p \leq q, 0 \leq j \leq q-p \right\}, \quad (VI.15)$$

en donde el coeficiente de grupo correspondiente se establece como $\sum_{n_1=1}^{n_1} \dots \sum_{n_q=1}^{n_q} c_{p,j,r}(n_1, \dots, n_q)$. En consecuencia, el conjunto completo de regresores del modelo es la unión de los diferentes grupos de la forma:

$$\bigcup_{\substack{j=0, \dots, q-p \\ p=0, \dots, q \\ q=0, \dots, l}} \Omega_{y_B^p u_A^j u_C^r} = \bigcup_{\substack{j=0, \dots, q-p \\ p=0, \dots, q \\ q=0, \dots, l}} \left\{ dc, \Omega_{y_B}, \Omega_{u_A}, \Omega_{u_C}, \Omega_{y_B^2}, \dots \right\}. \quad (VI.16)$$

Es necesario considerar la magnitud de la suma de los parámetros correspondientes a cada grupo para buscar grupos espurios en el modelo identificado. Un grupo con una suma de parámetros pequeña se define como un grupo espurio y puede ser eliminado sin afectar el comportamiento del error residual.

Una vez que los grupos espurios se han eliminado, los parámetros del modelo se calculan nuevamente excluyendo las columnas de la matriz de regresión Φ , que pertenecen a los términos espurios. Es importante señalar que la eliminación de los grupos espurios no evita en forma completa la generación de modelos sobreparametrizados.

En situaciones prácticas, una vez que los grupos espurios se han eliminado, es posible que existan efectos de compensación dentro de uno o más grupos efectivos, es decir, de grupos con una suma significativa de parámetros. Los efectos de compensación provienen de términos con valor de parámetros significativos y de signos opuestos que comparten información entre ellos. Los términos que producen efectos de compensación no se detectan fácilmente a través de la suma de parámetros

por grupo pero son evidentes cuando se despliegan los parámetros estimados relacionados con cada grupo. Los términos de compensación dentro de cada grupo, así como los grupos espurios, pueden ocultar la dinámica del sistema. En consecuencia, en el modelo del potencial evocado bimodal, es importante identificar los términos de grupos efectivos asociados a situaciones de compensación. Lo anterior ayudará a generar un modelo más simple que permitirá establecer la existencia del fenómeno intersensorial.

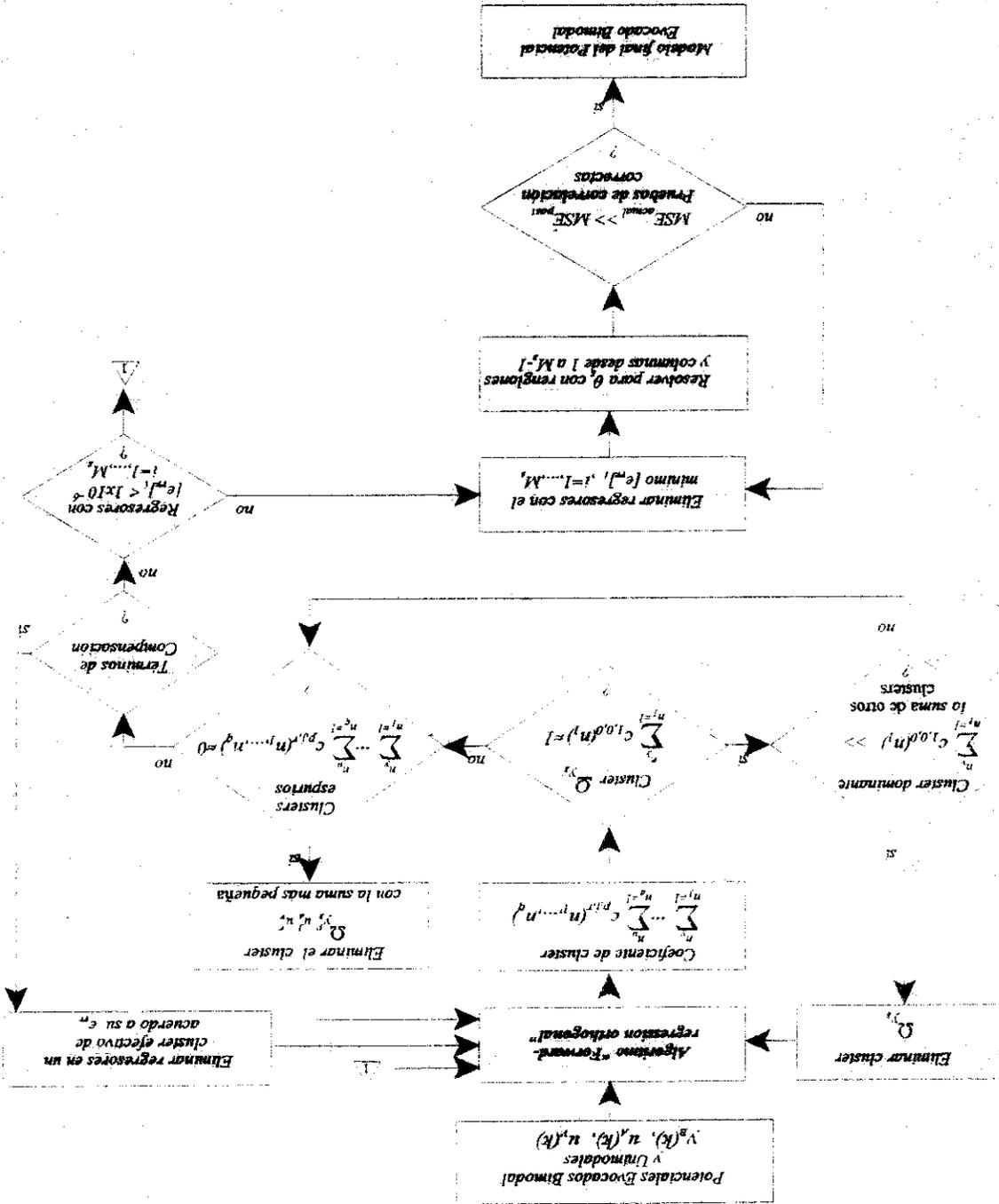
VI.5. Metodología para Obtener un Modelo de la Relación No-Lineal entre Vías Sensoriales

VI.5.1. Selección de la Estructura No-Lineal

En esta sección se describe el método propuesto de identificación de un sistema no-lineal en el modelado del potencial evocado bimodal incluyendo la eliminación de grupos espurios y términos de compensación.

En la figura VI.1. se presenta el diagrama a bloques del método propuesto. El método inicia con la aplicación del algoritmo “forward-regression orthogonal”. Posteriormente, se obtienen los coeficientes de grupo $\sum_{n_1=1}^{n_y} \dots \sum_{n_q=1}^{n_u} c_{p,j,r}(n_1, \dots, n_q)$ de cada grupo $\Omega_{y_b^p u_a^j u_r}$. Es posible que el algoritmo “forward-regression orthogonal” seleccione principalmente como términos significativos a regresores autorregresivos debido al comportamiento “lento” del potencial evocado bimodal. En este caso, la suma de los parámetros del grupo correspondiente a Ω_{y_b} es cercano a uno y dominante con respecto a la suma de coeficientes de otros grupos. La representación del potencial evocado bimodal en términos de un modelo autorregresivo, en el sentido del criterio del error cuadrático medio (MSE),

Figura VI.1. Metodología propuesta para el modelado no-lineal del potencial evocado bimodal en términos de las actividades auditiva y visual. Modelos no-sobreparametrizados se obtienen eliminando grupos espuros y términos de compensación e irrelevantes.



puede pensarse como un "buen modelo". Sin embargo, se oculta la dependencia de la actividad

bimodal en términos de actividades unimodales y en consecuencia, se requiere evitar esta situación. Bajo la condición anterior, el grupo Ω_{y_s} se elimina y se aplica nuevamente el algoritmo “forward-regression orthogonal” con las columnas correspondientes a los regresores en el grupo Ω_{y_s} iguales a cero. En otros casos es necesario investigar y eliminar grupos espurios.

Los grupos espurios se detectan por el valor pequeño de las sumas de los coeficientes pertenecientes a cada grupo. Si se detecta un grupo espurio, se igualan a cero todos los regresores correspondientes al grupo y se aplica nuevamente el algoritmo “forward-regression orthogonal”. Una vez que los grupos espurios son eliminados, la metodología propuesta investiga la existencia de términos de compensación al interior de cada grupo efectivo.

Los términos de compensación se identifican por sus coeficientes relativamente grandes y de signo opuesto. Para conservar la dinámica del sistema, los términos de compensación se eliminan de acuerdo a su relevancia en el modelo identificado en base a la razón de la reducción del error $[e_{rr}]_i$. Cada vez que se elimina un término de compensación su columna correspondiente en la matriz de regresión se iguala a cero y el algoritmo “forward-regression orthogonal” es aplicado nuevamente. El procedimiento se repite hasta que los términos de compensación son eliminados. Una vez que no existen términos de compensación, es necesario investigar y eliminar regresores que no contribuyen significativamente al modelo. En la presente investigación, los términos con $[e_{rr}]_i < 1 \times 10^{-6}$, $i=1, \dots, M_s$ se consideran términos irrelevantes.

Después de la eliminación de grupos espurios, términos de compensación e irrelevantes, aún

es posible eliminar términos en base al MSE y pruebas de correlación. El primer candidato a ser eliminado es el término con el menor $[e_{rr}]_i$. Si el MSE no se incrementa significativamente después de la eliminación de este término, los parámetros del sistema Θ_s son calculados nuevamente sin la necesidad de aplicar el algoritmo "forward regression orthogonal". El procedimiento se repite hasta que el MSE se incrementa significativamente con respecto al valor previo o si las pruebas globales y locales de correlación no son adecuadas.

VI.6. Resultados del Modelo NARMAX con Datos Sintetizados

En el capítulo V se utilizó parte de la metodología propuesta en la figura VI.1 para obtener un modelo con una estructura no sobreparametrizada. El modelo identificado en la sección V.4 se determina por la ecuación:

$$y[n] = 1.242u_1[n-1] + 0.352u_1[n-4] + 0.252u_1[n-8] + 0.47u_2[n] + 0.451u_2[n-7] + 0.704u_1[n]u_1[n-4] + 0.197u_2[n-1]u_2[n-2] + 0.047u_1[n]u_2[n]. \quad (VI.17)$$

Tabla VI.1. Regresores ordenados de acuerdo a su valor $[e_{rr}]_i$		
Posición	$[e_{rr}]_i$	Regresor
34	8.737e-001	$u_1[n]u_1[n-4]$
346	1.132e-001	$u_2[n-1]u_2[n-2]$
3	9.954e-003	$u_1[n-1]$
16	2.828e-003	$u_2[n]$
23	1.930e-004	$u_2[n-7]$
6	3.766e-005	$u_1[n-4]$
44	7.083e-005	$u_1[n]u_2[n]$
10	3.330e-006	$u_1[n-8]$

El modelo anterior se obtuvo evaluando la suma de los coeficientes de los diferentes grupos que se formaron de acuerdo al orden y al número de entradas y salidas, ecuación VI.11. Sin embargo, ninguna de las sumas de los coeficientes de grupo fue despreciable como para eliminar todo el grupo. A continuación se eliminaron los términos de compensación, etapa propuesta en esta tesis al observar los efectos de compensación entre los regresores dentro de cada grupo.

La etapa final en la metodología propuesta es la eliminación de los regresores irrelevantes. En

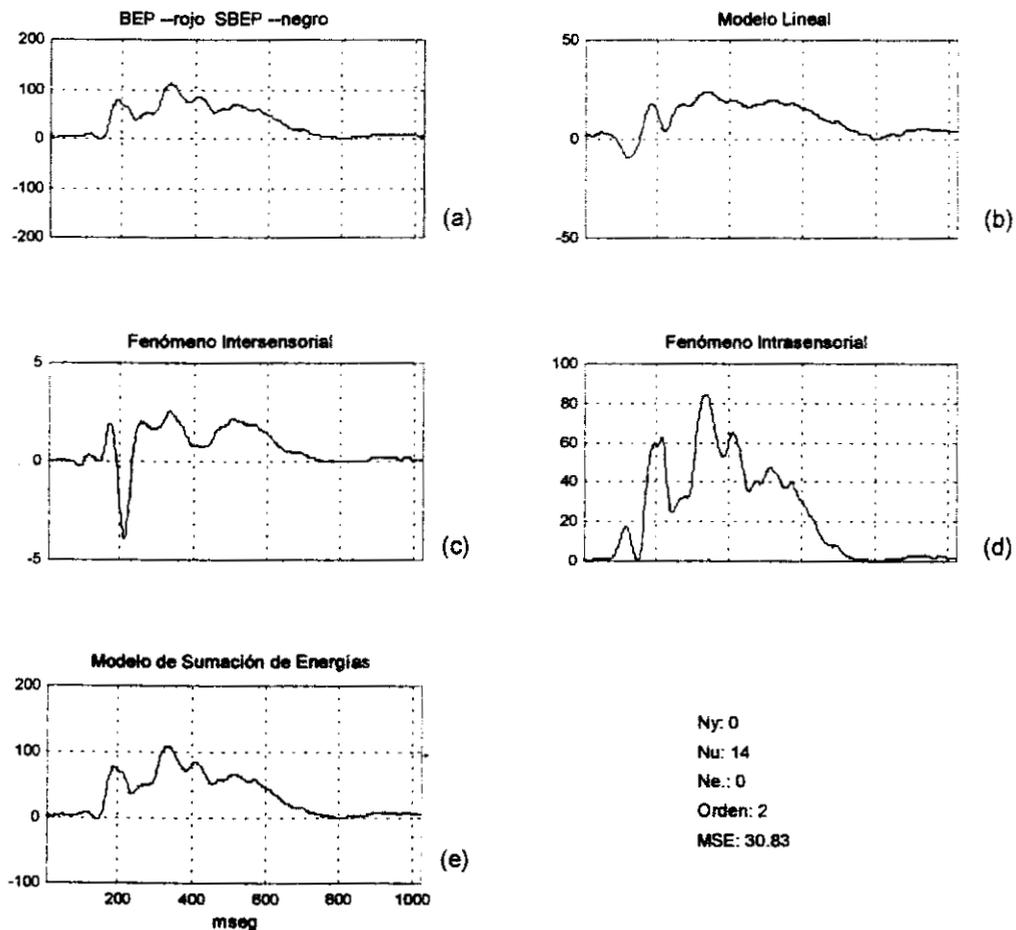


Figura VI.2. (a) Potencial evocado bimodal adquirido (rojo) y señal sintetizada por el modelo (negro), (b) contribución lineal del modelo, (c) contribución no-lineal correspondiente a la actividad generada por productos cruzados, (d) actividad no-lineal generada al interior de las vía sensoriales y (e) actividad generada por la suma de (b) y (c).

la Tabla VI.1 se listan los regresores de la ecuación VI.17 en forma descendente de acuerdo a su valor . Como puede observarse el regresor es el primer candidato a ser eliminado.

Como se indica en la metodología propuesta es necesario investigar el cambio en el valor MSE así como evaluar las pruebas de correlación. En la figura VI.2.(a) se muestra la señal sintetizada antes de eliminar el término mientras que en las figuras VI.2.(b)-(e) se muestran las señales correspondientes a las diferentes salidas que se obtienen a partir de la formulación matemática del potencial evocado bimodal. También se muestra el valor del MSE correspondiente. En la figura VI.3

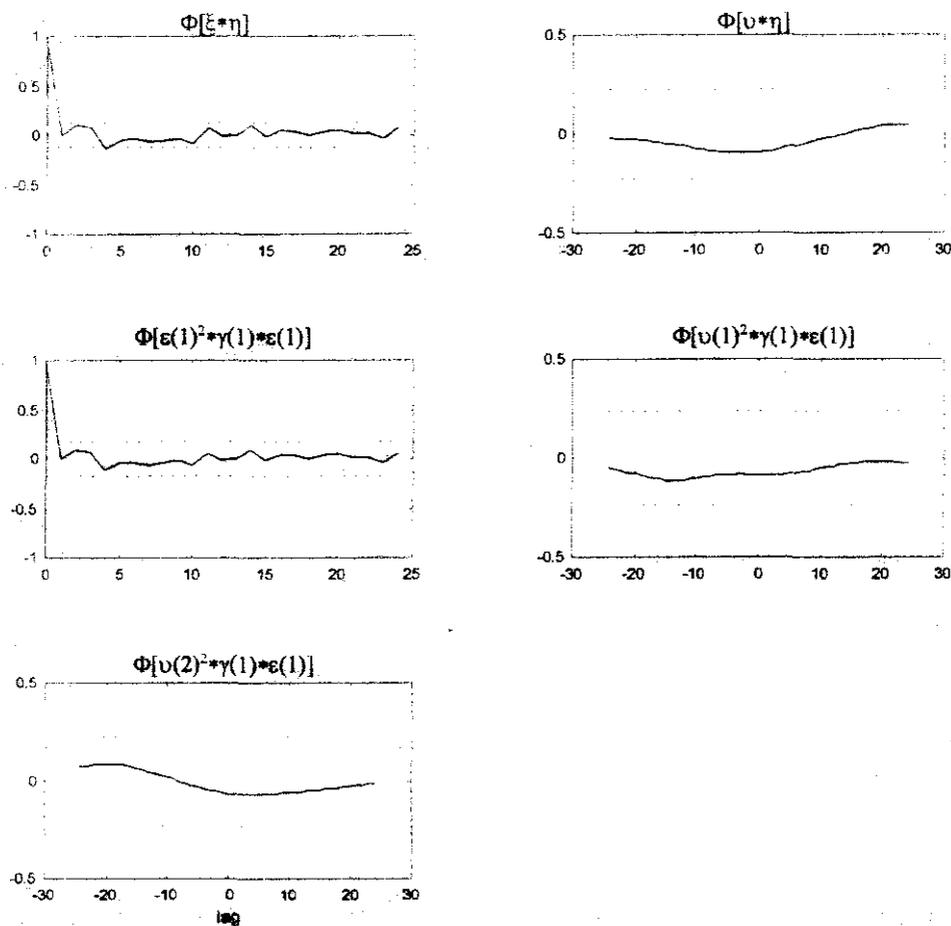


Figura VI.3. Pruebas de correlacion globales y locales para el modelo identificado.

se muestran las pruebas de correlación globles y locales para el modelo de la ecuación VI.17. Como puede observarse todas las pruebas se encuentran dentro de los límites de confianza establecidos.

En la figura VI.4 se muestran las señales cuando el término se ha eliminado. La señal sintetizada es una buena aproximación de la señal adquirida y el valor del MSE no se modifica sustancialmente. Las pruebas de correlación mostradas en la figura VI.5 indican que se trata de un “buen” modelo identificado. Si el procedimiento de eliminar términos irrelevantes se aplica

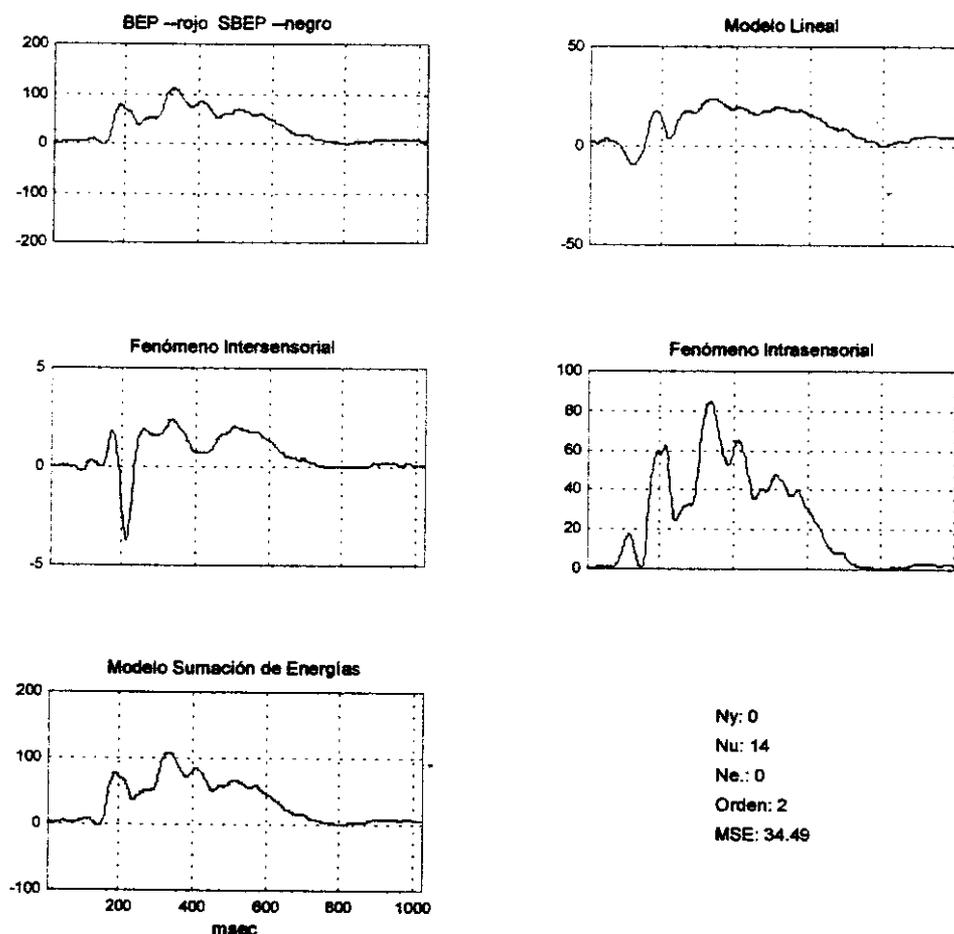


Figura VI.4. (a) Potencial evocado bimodal adquirido (rojo) y señal sintetizada por el modelo (negro), (b) contribución lineal del modelo, (c) contribución no-lineal correspondiente a la actividad generada por productos cruzados, (d) actividad no-lineal generada al interior de las vía sensoriales y (e) actividad generada por la suma de (b) y (c).

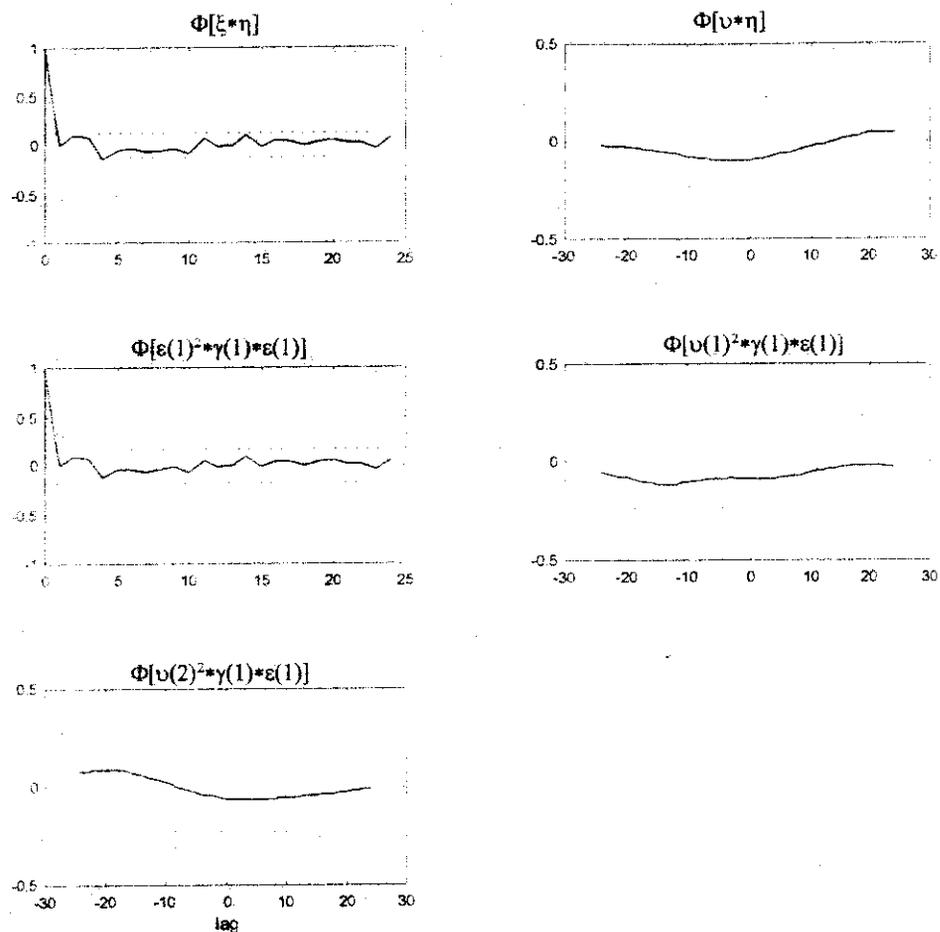


Figura VI.5. Pruebas de correlacion globales y locales para el modelo identificado.

nuevamente y se elimina el regresor $u_1[n]u_2[n]$, el valor del MSE se incrementa a 112.3 y en consecuencia, la señal sintetizada observa ciertas desviaciones de la señal original.

En el siguiente capítulo se aplica el procedimiento propuesto, utilizando los potenciales unimodales y bimodal adquiridos, para generar una estructura que permita analizar las contribuciones lineales y no-lineales existentes en el modelado del potencial evocado bimodal.

VI.7. Conclusiones.

Modelos con grupos espurios, términos de compensación y términos irrelevantes pueden generarse al aplicar el algoritmo "forward regression orthogonal". Modelos sobreparametrizados pueden ocultar el análisis del fenómeno bajo estudio. Por esta razón en el presente capítulo se propone una metodología que permite eliminar los grupos y términos mencionados. La metodología propuesta se ejemplifica continuando el ejemplo del capítulo anterior.

Diseño de Paradigmas Utilizados en el Análisis del Fenómeno Intersensorial

VII.1. Introducción

Con el propósito de mostrar el comportamiento cognoscitivo de varios sujetos incluidos en el presente trabajo, en la figura VII.1.1 se muestran los potenciales evocados adquiridos para el electrodo Pz. Como puede observarse la amplitud, la latencia y el grado de traslape de los componentes de los potenciales evocados bimodales se comportan en forma diferente, posiblemente de acuerdo a factores como la experiencia del sujeto, concentración en el experimento, etc. En la

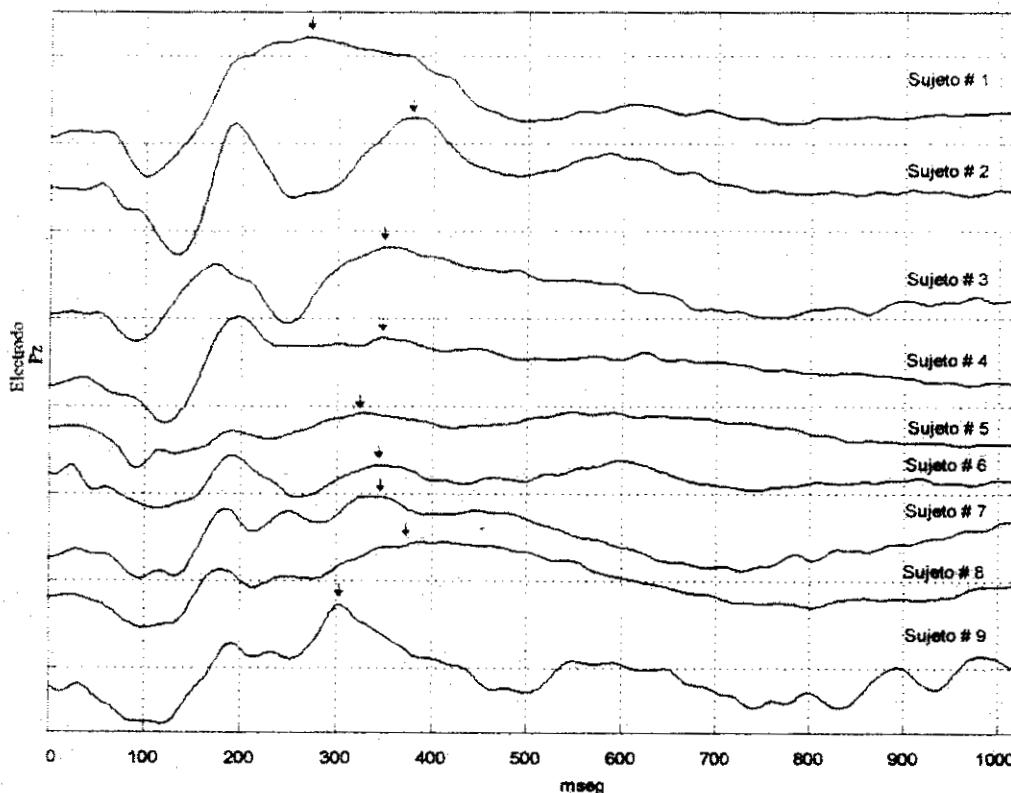


Figura VII.1.1. Potenciales evocados bimodales en el electrodo Pz para nueve sujetos. Como puede observarse la amplitud y la latencia de los componentes del potencial son dependientes del sujeto. La latencia del componente P300 se indica mediante una flecha.

figura se observa que el componente P300 se comporta diferente, es decir, existen sujetos que generan un componente P300 con una latencia temprana y de gran amplitud, originando un traslape significativo con los componentes exógenos. Por otra parte, existen sujetos que muestran menor traslape y en consecuencia, una mejor definición de los componentes del potencial evocado bimodal. Por ejemplo, para el sujeto # 1 se puede observar el componente N1 mientras que los componentes P200 y P300 se combinan generando una sola onda. En cambio, para el sujeto # 7 es posible observar la división del componente bimodal N1, el componente P2, la actividad relacionada con el proceso de categorización del estímulo auditivo y con el proceso de post-categorización del estímulo visual y el proceso de cierre indexado por el componente P300. En la figura VII.1.1, los diferentes componentes P300, señalados por una flecha, fueron confirmados para todos los sujetos por su distribución parietal-occipital. En consecuencia y en base a los diferentes comportamientos de los BEPs para el presente trabajo, enfocado a evidenciar relaciones intersensoriales, se asume que no es conveniente obtener un gran promedio de los potenciales evocados debido a los diferentes procesos de información que se generan en iguales condiciones experimentales.

A pesar de las diferencias de los potenciales evocados bimodales, persiste el cuestionamiento de como se combina la información unimodal en la generación del potencial evocado bimodal. Por lo tanto, el análisis segmentado propuesto en el capítulo III dependerá de la información electrofisiológica obtenida de cada sujeto. En consecuencia, en los capítulos dedicados a modelar en forma no-lineal el potencial evocado bimodal se utiliza la información eléctrica adquirida de un sujeto sometido a seis diferentes experimentos. La idea es mostrar que el fenómeno intersensorial depende de las condiciones experimentales, es decir, de la dificultad en decidir qué información es la importante en la toma de decisión de un sujeto.

Las interacciones sensoriales se han estudiado utilizando diferentes atributos de los estímulos base como el color, tono, ubicación, etc. La mayoría de los estudios se han enfocado sobre el análisis de la información conductual, es decir, el tiempo de reacción, y la importancia de la amplitud y latencia de los diferentes componentes del potencial evocado. En el presente capítulo se proponen seis paradigmas utilizando estímulos auditivos y visuales. El objetivo de los paradigmas propuestos es encontrar evidencia electrofisiológica de la interacción entre las vías sensoriales auditiva y visual, utilizando información de los potenciales evocados unimodales y bimodales. Los diferentes experimentos son diseñados con la idea de decrementar gradualmente la discriminabilidad del estímulo relevante, es decir, la dificultad de la tarea asignada al sujeto se incrementa gradualmente a través de los experimentos. Los estímulos considerados en los experimentos están relacionados en forma no natural y natural. Una relación no natural es considerada cuando los estímulos en las diferentes vías sensoriales no tienen el mismo significado cognoscitivo, en contraste una relación natural se asume cuando la estimulación visual y auditiva proporcionan información de un mismo evento. Los resultados de los diferentes experimentos se evalúan en forma cualitativa indicando los cambios morfológicos de los potenciales unimodales y bimodales así como posibles interacciones sensoriales.

VII.2. Experimento # 1

VII.2.1 Objetivo del Experimento

Como un punto de inicio en la investigación del fenómeno intersensorial, el primer experimento está orientado a estudiar el comportamiento del potencial evocado bimodal cuando se utilizan estímulos visuales y auditivos ortogonales. Se generan estímulos ortogonales cuando estímulos en vías diferentes no se asocian a un mismo evento. Los tópicos específicos a investigar

son: (a) El fenómeno intersensorial bajo condiciones de estimulación ortogonal y la no asignación de una tarea al sujeto (b) Estudio cualitativo de la morfología del potencial evocado bimodal cuando los estímulos visual y auditivo se presentan defasados temporalmente y sus efectos sobre el fenómeno intersensorial.

VII.2.2. Método

Estímulos

- Estímulos Unimodales: Tono y flash. El tono se presenta en forma binaural a través de audífonos insertables mientras que el flash se presenta como un círculo de color al centro de la pantalla de un monitor de computador de 17 pulgadas.
- Estímulos Bimodales: Flash y tono se presentan en forma simultánea y asíncrona.
$$\text{Flash} - \Delta t - \text{tono.} \quad \Delta t = 0, 20, 40, 60, 80 \text{ mseg.}$$
- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con igual probabilidad de ocurrencia. En cada época se le presenta al sujeto un estímulo unimodal o bimodal.
- Intervalo entre estímulos: de 2 a 3 segundos, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Tono: Tono de 1000 Hz con 60 milisegundos de duración, tiempo de subida y de bajada de 10 milisegundos e intensidad de 80 dB.

- **Flash:** Flash de color rojo con 60 milisegundos de duración presentado al centro de un monitor de computadora utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- **Número de épocas:** 700 épocas con 100 estímulos de cada tipo.
- **Frecuencia de muestreo:** 500 Hz
- **Número de muestras:** 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- **Duración de cada época:** 1094 milisegundos
- **Número de canales:** 20
- **Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.**
- **Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.**

Tarea Asignada al Sujeto

El experimento considera una condición pasiva del sujeto. El sujeto escucha y observa los estímulos sin ejecutar ninguna tarea, y sólo se le solicita fijar la vista en una pequeña cruz, a la mitad de la pantalla, que aparece entre estímulos visuales.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo.

Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto con localizaciones de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijándose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que estan contaminadas con movimiento ocular.

VI.2.3. Potenciales Evocados Adquiridos

Los potenciales evocados por los diferentes estímulos del presente experimento se describen en términos de sus componentes positivos y negativos que se presentan a latencias típicas. En el capítulo III se proporcionan detalles de los diferentes componentes “endógenos” y “exógenos” que se pueden presentar en un potencial evocado. Sin embargo, es importante recordar que los componentes exógenos de un potencial evocado dependen de las características del estímulo mientras que los componentes endógenos estan relacionados a procesos cognoscitivos.

En el experimento, debido a que el sujeto únicamente recibe la estimulación sin ejecutar ninguna decisión, es de esperarse que el potencial evocado bimodal refleje la interacción, en caso de existir, entre los componentes exógenos unimodales y los componentes asociados con el proceso de categorización de los estímulos.

El formato de presentación de los resultados experimentales es como sigue: primero se

muestra la distribución espacial de la actividad eléctrica y mapas topográficos de algunos componentes, posteriormente, se presentan las señales en donde es más prominente la actividad y

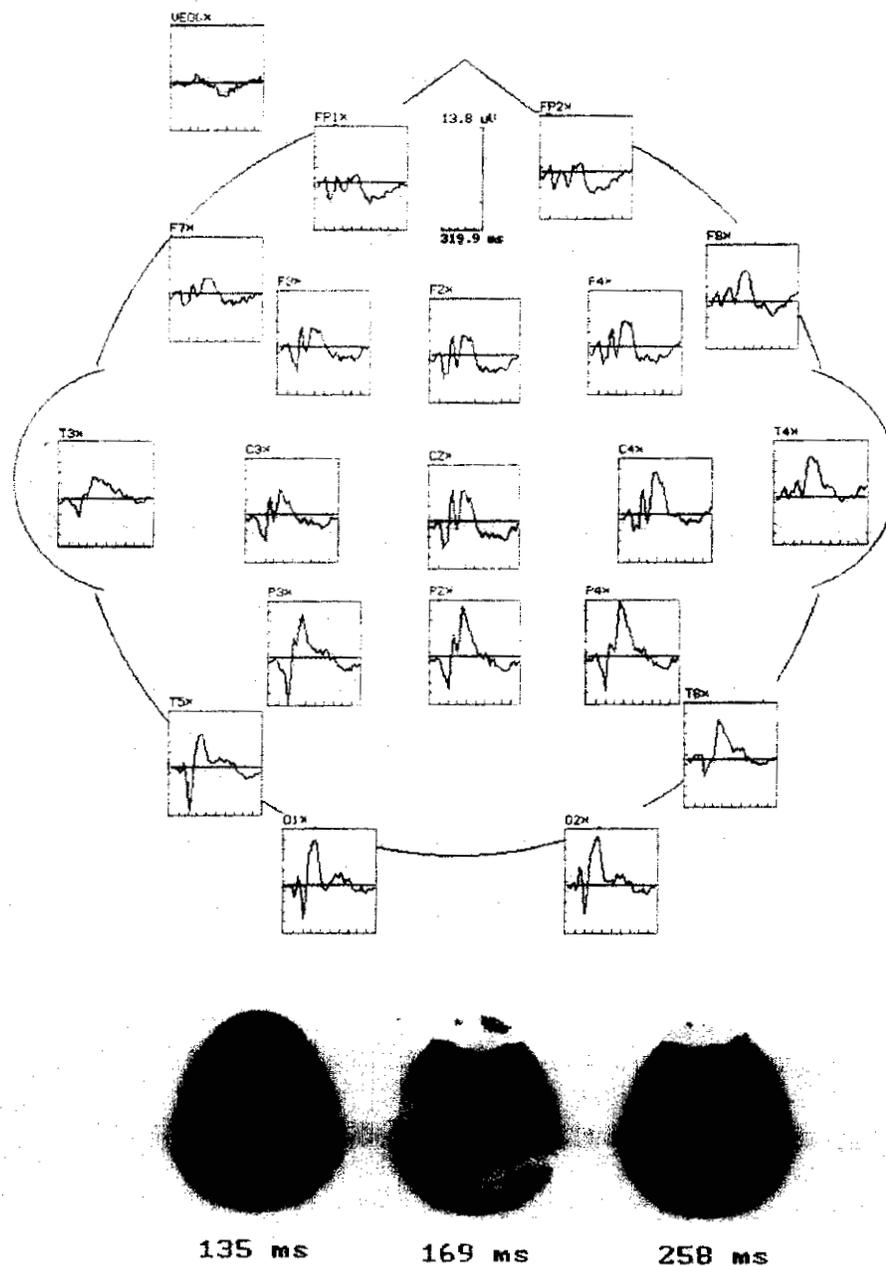


Figura VII.2.3.1. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100, P200 y P300.

finalmente, se muestran las señales que comprueban la existencia de los diferentes componentes en el potencial adquirido. La actividad visual se muestra en los electrodos Cz, Pz, y O1 mientras que la actividad auditiva y bimodal se muestran en los electrodos Fz, Cz, and Pz.

En la figura VII.2.3.1 se muestra la distribución espacial del potencial evocado visual. Como puede observarse, el potencial muestra la distribución típica reportada en la literatura, es decir la actividad del potencial evocado visual se concentra en las regiones parietal y occipital. Los mapas topográficos de los componentes exógenos visuales correspondientes a N100 y P200, así como el mapa del componente endógeno P300, se muestran en la parte inferior de la figura VII.2.3.1, respectivamente.

En la figura VII.2.3.2 se observa con mayor detalle la morfología del potencial evocado visual, el componente exógeno N100, indicado con N1 en la figura, incrementa su magnitud desde

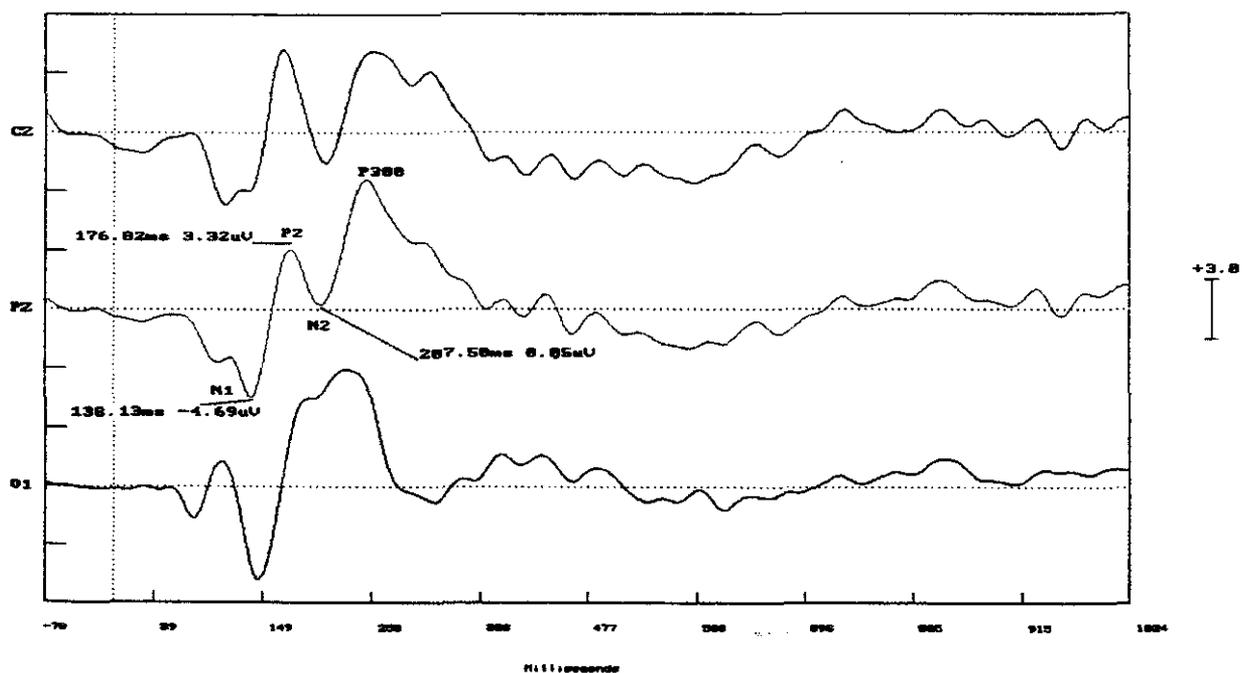


Figure VII.2.3.2. Potencial evocado por un flash de color rojo en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan para el electrodo Pz indicando sus latencias.

la región central hacia la región occipital mientras que el componente exógeno P200 es más evidente en la región del vertex. El componente endógeno N200, indicado en la figura como N2, es más evidente en las regiones del vertex y parietales.

Probablemente, debido a la dificultad de evitar poner atención a la presentación del estímulo visual una componente pequeña P300 aparece a los 258 milisegundos en el electrodo Pz. Este componente será comparado con los obtenidos en los experimentos subsiguientes en donde el sujeto tiene una tarea específica. También es posible observar ondulaciones ("rhythmic after discharge phase") después de los 360 milisegundos en los potenciales evocados visuales, ondulaciones que se han asociado con la actividad alfa.

Con el propósito de validar cada uno de los componentes en los potenciales evocados, es conveniente obtener réplicas de los potenciales evocados promediando por separado épocas pares e impares. La figura VII.2.3.3 muestra las réplicas obtenidas mediante el procedimiento anterior y

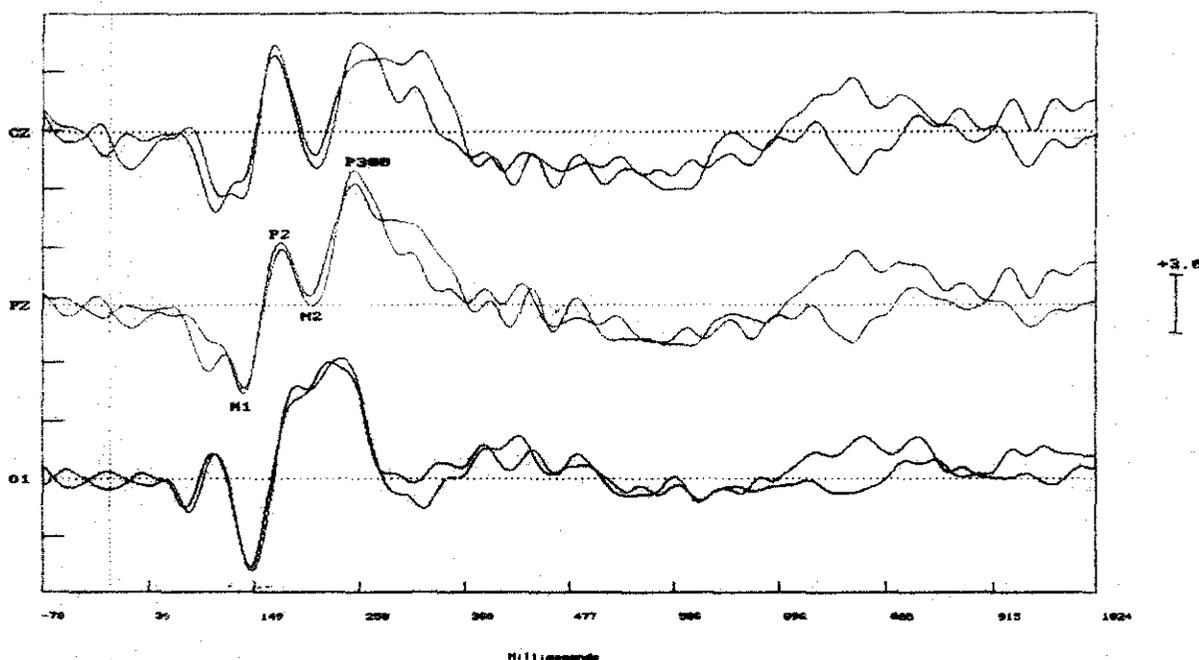


Figura VII.2.3.3 Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

confirma la existencia de los componentes N1, P2, N2 y P300.

La distribución espacial del potencial evocado auditivo, mostrado en la figura VII.2.3.4,

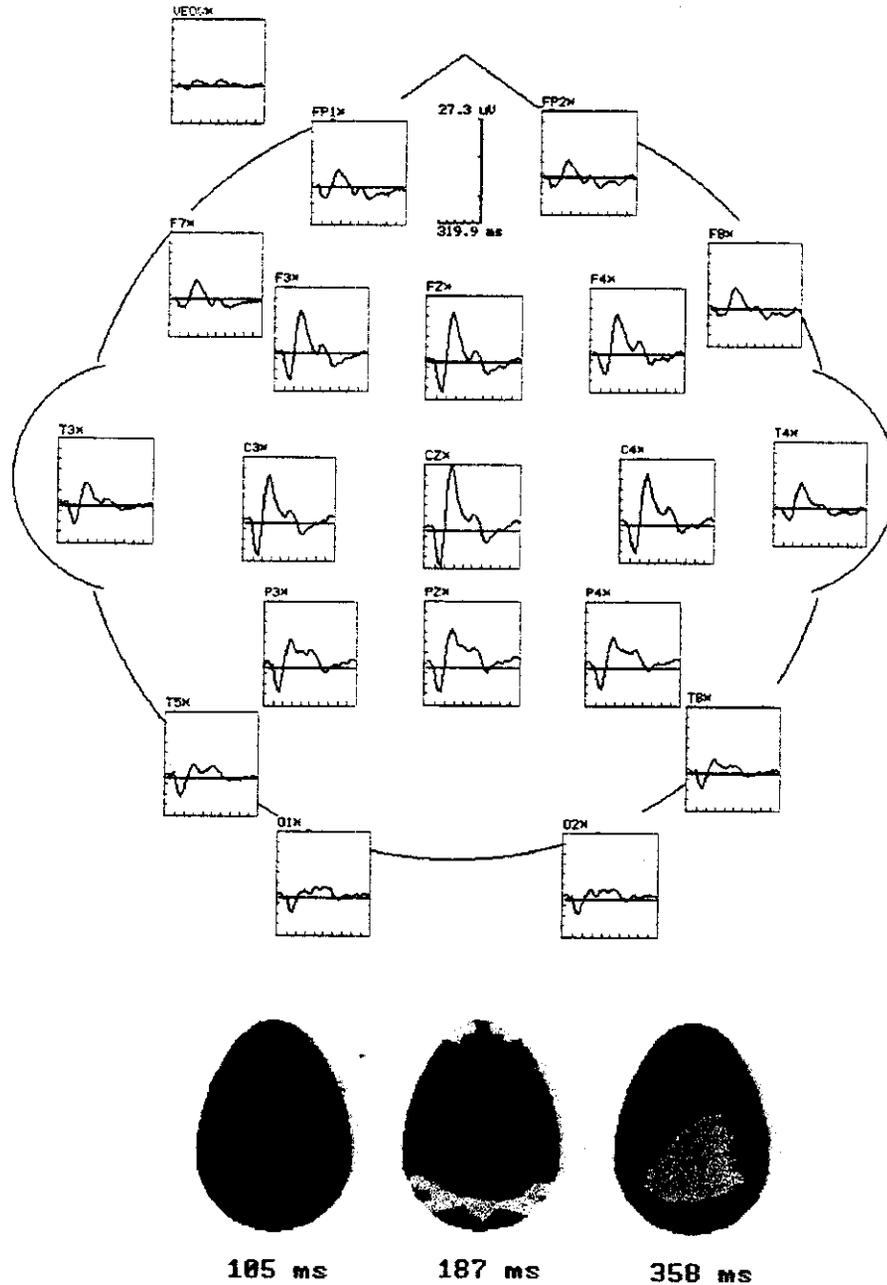


Figure VII.2.3.4. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100, P200 y P300.

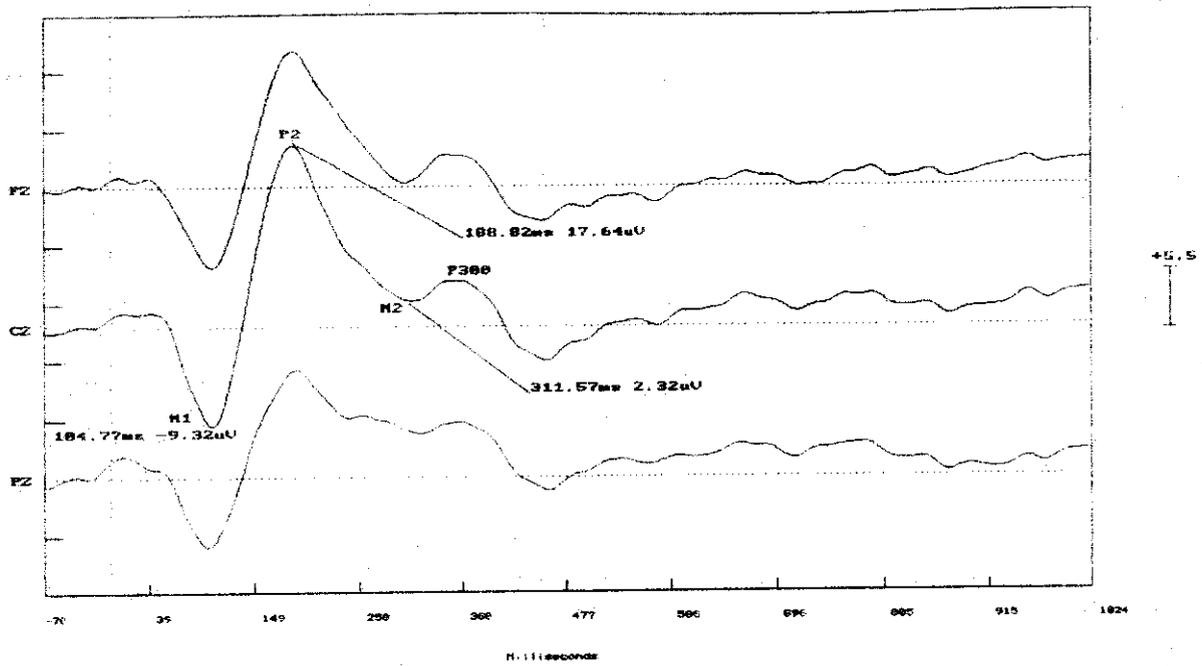


Figura VII.2.3.5. Potencial evocado por un tono de 1000 Hz en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan para el electrodo Cz indicando sus latencias.

presenta una actividad importante en la región frontal y vertex del cerebro. Los mapas topográficos

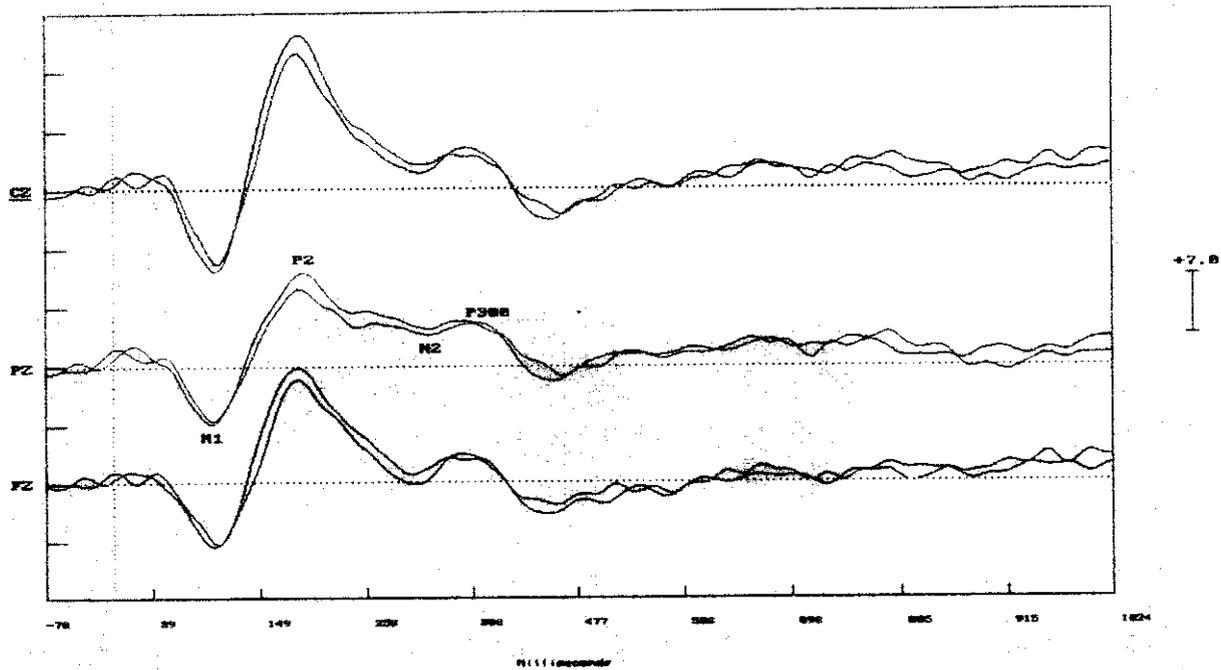


Figura VII.2.3.6. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediando las épocas pares e impares.

de los componentes exógenos auditivos correspondientes a N100 y P200, así como el mapa del componente endógeno P300, se muestran en la parte inferior de la figura VII.2.3.4, respectivamente.

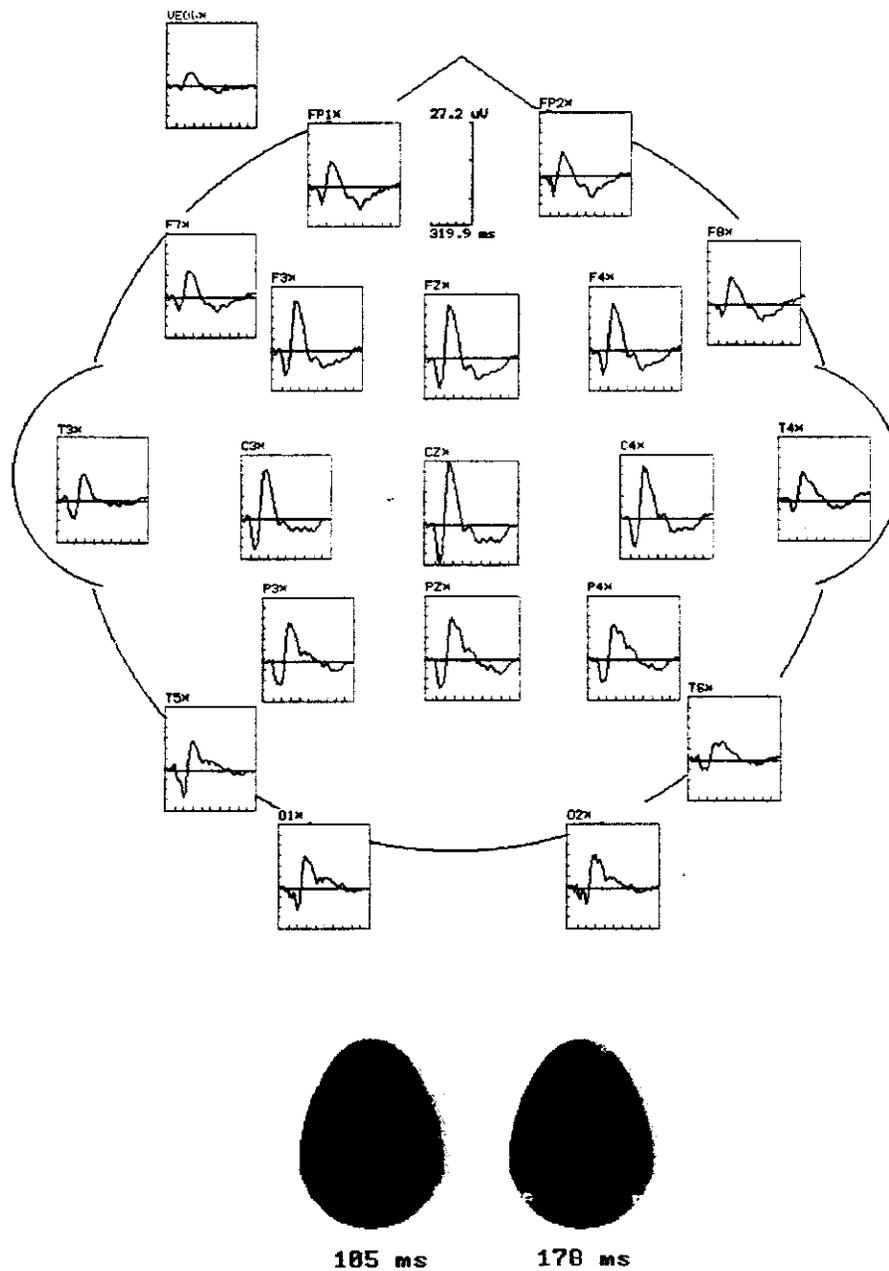


Figura VII.2.3.7. Distribución espacial del potencial evocado bimodal. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100 y P200.

En la figura VII.2.3.5 se muestra el potencial evocado por un tono de 1000 Hz para los electrodos Fz, Cz y Pz. El potencial muestra cuatro componentes bien definidos, etiquetados como N1, P2, N2, and P300. En forma similar al potencial evocado visual, la amplitud del componente P300 es pequeña, y es posible que se genere debido a la dificultad de no poner atención al tono de 1000 Hz. En la figura VII.2.3.6 se muestran las réplicas, obtenidas con el procedimiento explicado para el potencial evocado visual, que confirman la existencia de los componentes antes mencionados.

La distribución espacial del potencial evocado bimodal, para la condición experimental en donde los estímulos unimodales se presentan simultáneamente, se muestra en la figura VII.2.3.7. La actividad del potencial evocado bimodal se extiende en mayor medida que las actividades de los potenciales unimodales, sugiriendo que la actividad bimodal es generada por la combinación de las actividades unimodales. Los mapas topográficos de las componentes bimodales N100 y P200 se

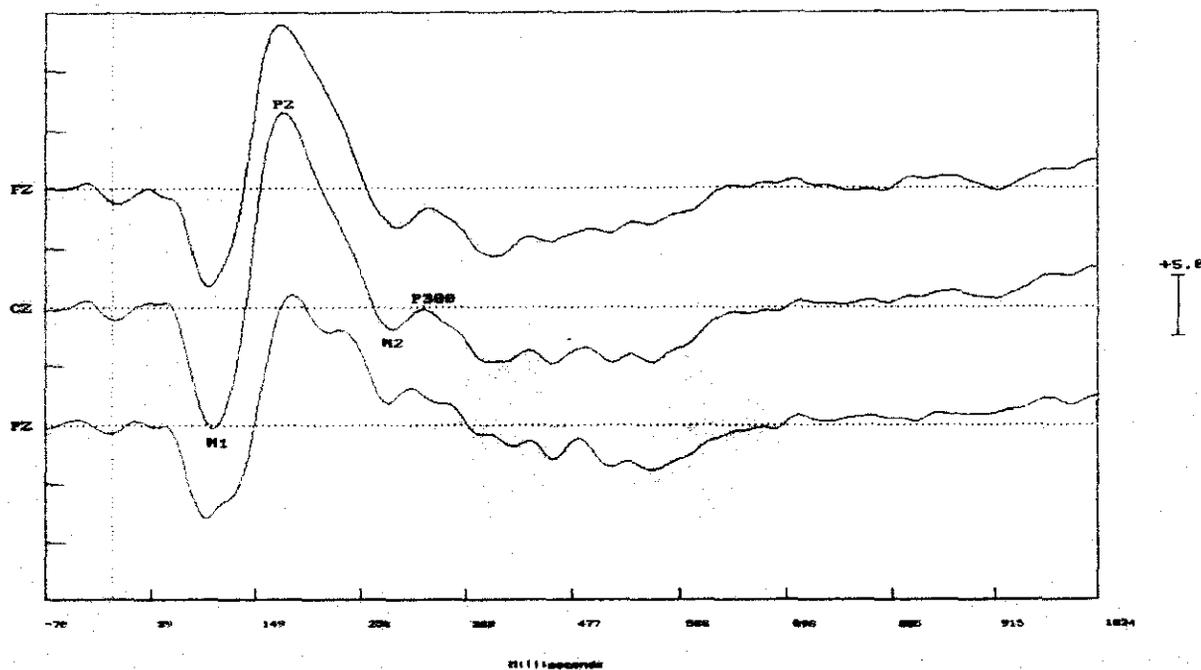


Figura VII.2.3.8. Potencial evocado bimodal obtenido presentando simultáneamente un flash de color rojo y un tono de 1000 Hz.

incluyen en la parte inferior de la figura VII.2.3.7.

El potencial evocado bimodal adquirido mostrado en la figura VII.2.3.8 presenta componentes exógenos bien definidos N100 y P200. Una pequeña componente endógena indicada como P300 aparece a los 300 milisegundos. La amplitud y latencia del componente bimodal P300 serán analizados en los diferentes experimentos en la investigación. El potencial evocado bimodal muestra una actividad relevante hasta los 400 milisegundos. Para verificar la existencia de los componentes N1, P2, N2 y P300, se obtuvieron réplicas del potencial bimodal mediante la promediación de las épocas pares e impares. El resultado se muestra en la figura VII.2.3.9 en donde es evidente la presencia de todos los componentes mencionados.

El modelo más simple para explicar la génesis del potencial evocado bimodal, modelo que ha sido relacionado con el procesamiento independiente de información sensorial, es la suma de las

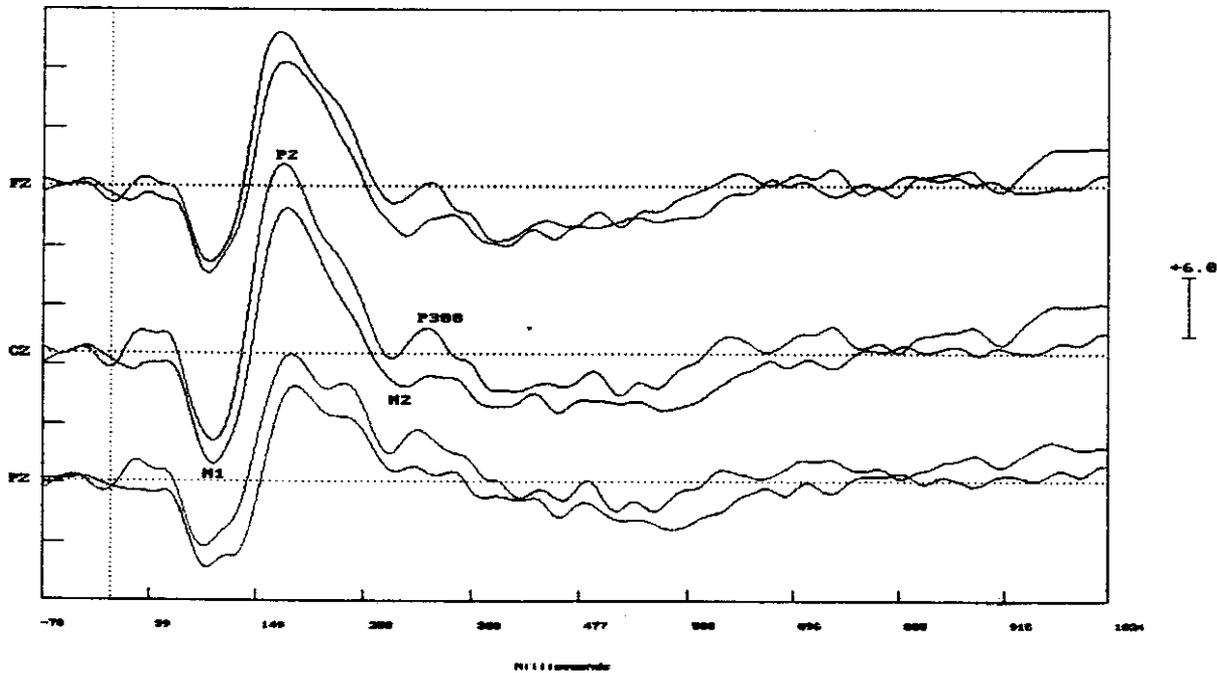


Figura VII.2.3.9. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

actividades eléctricas unimodales. En la figura VII.2.3.10 se muestra el potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP), mediante la suma de las actividades unimodales en el electrodo Pz, y el potencial evocado adquirido (BEP). Como puede observarse de la figura VII.2.3.10, la amplitud de los componentes N1 y P2 se ajustan aproximadamente al modelo de suma mientras que a partir de los 200 milisegundos existe una mayor desviación.

Los efectos del retraso de la estimulación auditiva con respecto del estímulo visual se muestran en los potenciales evocados bimodales presentados en la figura VII.2.3.11. Se puede

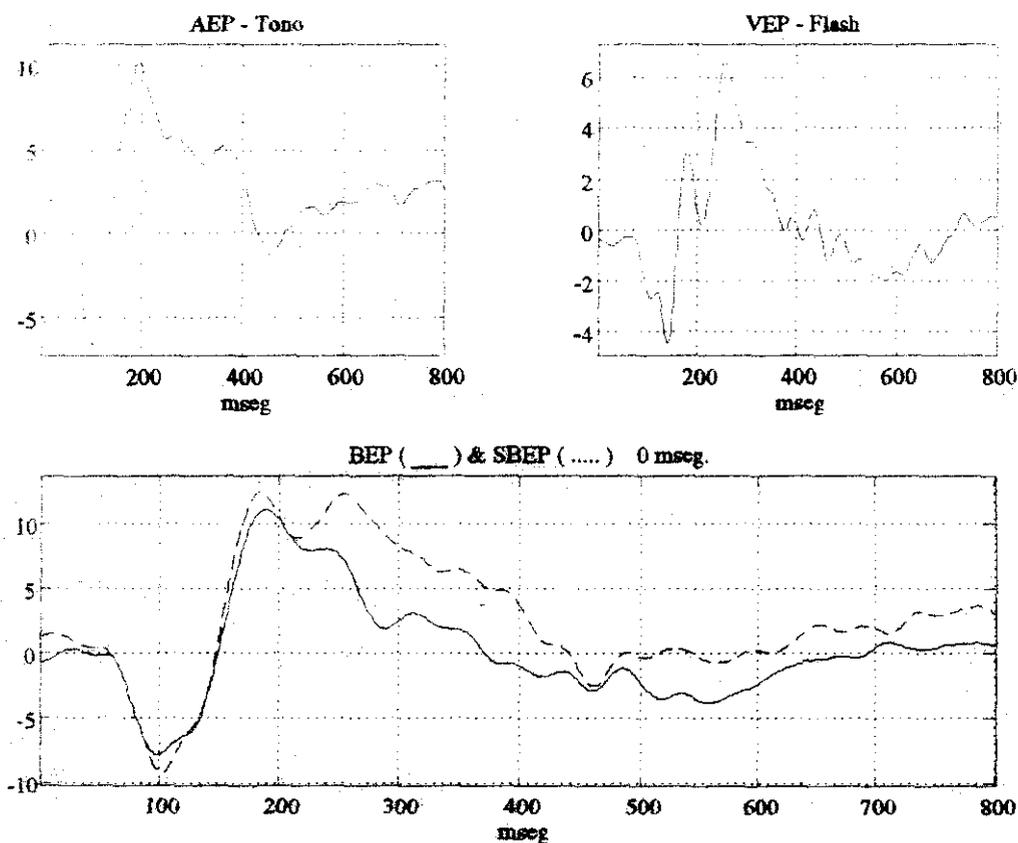


Figura VII.2.3.10. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) Potencial evocado auditivo (AEP) por un tono de 1000 Hz, (b) Potencial evocado visual (VEP) por un flash de color rojo, (c) Potencial evocado bimodal (BEP) y potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP) con estimulación simultánea.

observar que existen cambios de amplitud en los componentes N100 y P200 dependientes del retraso temporal. El componente N100 presenta la mayor amplitud al utilizar un retraso de 20 milisegundos mientras que el componente P2 es mayor para el retraso de 80 milisegundos.

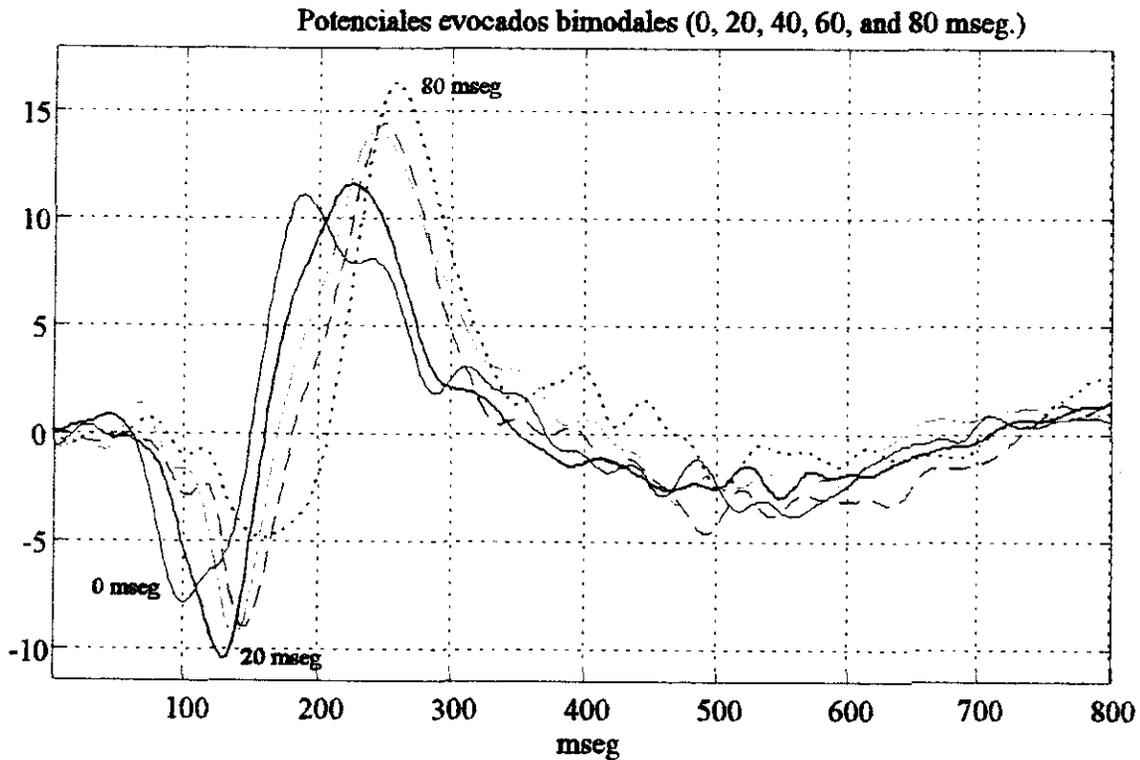


Figura VII.2.3.11. Potenciales evocados bimodales, en el electrodo Pz, obtenidos utilizando diferentes retrasos entre los inicios de los estímulos auditivo y visual.

VII.2.4 Conclusiones del experimento # 1

Los componentes de los potenciales evocados unimodales obtenidos en el presente experimento coinciden con los reportados en la literatura. Es importante observar que la morfología del potencial evocado bimodal, en términos generales, es diferente a la morfología del potencial evocado auditivo o visual. También es importante observar que el potencial evocado bimodal

sintetizado por la suma aritmética de las actividades unimodales, no es suficiente para explicar los eventos generados en el potencial evocado bimodal adquirido.

VII.3 Experimento # 2

VII.3.1. Objetivo

El segundo experimento se enfoca al análisis de los efectos de un estímulo accesorio cuando el estímulo objetivo (target) se presenta en una vía sensorial diferente. El paradigma considera un estímulo visual "target" y un estímulo auditivo "accesorio". Los puntos específicos a investigar en el presente experimento son: (a) identificación de los componentes exógenos y endógenos cuando se utilizan estímulos ortogonales y el sujeto necesita generar una decisión, (b) estudio del fenómeno intersensorial en condiciones de estimulación ortogonal cuando se le asigna una tarea al sujeto y (c) estudio de la morfología del potencial evocado bimodal cuando el inicio del estímulo visual y auditivo se defasan, y sus efectos sobre el fenómeno intersensorial.

VII.3.2. Método

Estímulos

- Estímulos Unimodales: Tono y flash. El tono se presenta en forma binarual a través de audífonos insertables mientras que el flash se presenta como un círculo de color al centro de la pantalla de un monitor de computador de 17 pulgadas.
- Estímulos Bimodales: Flash y tono se presentan en forma simultánea y retrasada.

Flash - Δt - tono. $\Delta t = 0, 20, 40, 60, 80$ mseg.

- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con igual probabilidad de ocurrencia. En cada época se le presenta al sujeto un estímulo unimodal o bimodal.

- Intervalo entre Estímulos: de 2 a 3 segundos, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Tono: Tono de 1000 Hz con 60 milisegundos de duración, tiempo de subida y de bajada de 10 milisegundos e intensidad de 80 dB.
- Flash: Flash de color rojo con 60 milisegundos de duración presentado al centro de un monitor de computadora utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- Número de épocas: 700 épocas con 100 estímulos de cada tipo.
- Frecuencia de muestreo: 500 Hz
- Número de muestras: 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- Duración de cada época: 1094 milisegundos
- Número de canales: 20
- Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.
- Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.

Tarea Asignada al Sujeto

El sujeto necesita oprimir un botón cuando el estímulo visual de color rojo se presenta solo o en combinación con el estímulo auditivo, y evitar generar una respuesta en otra condición de

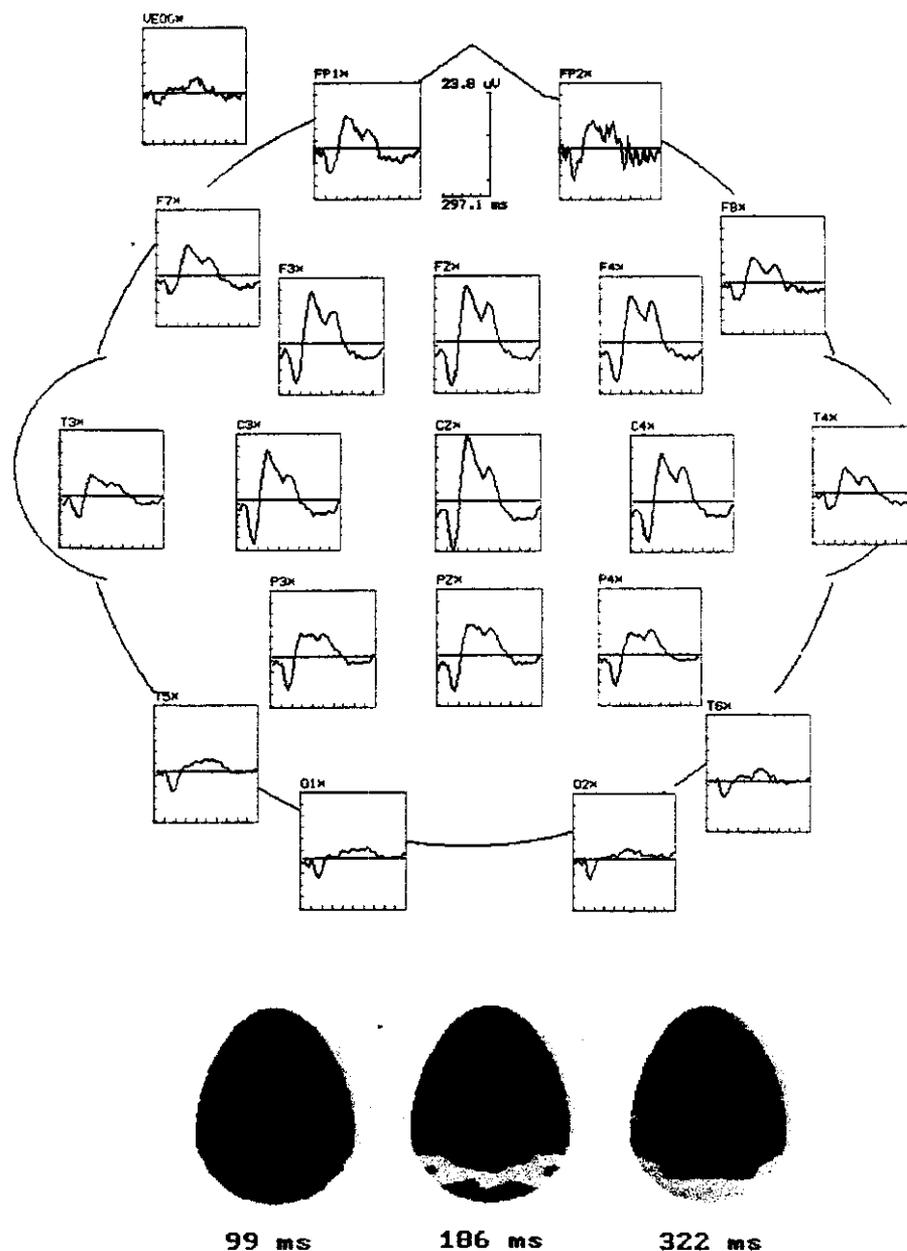


Figura VII.3.3.1. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100, P200 y P300.

estimulación. Al sujeto se le solicita ignorar el estímulo auditivo y fijar la vista en la pequeña cruz que se presenta, entre estimulación visual, a la mitad de la pantalla.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo. Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto; sus localizaciones estan de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijandose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que estan contaminadas con movimiento ocular.

VII.3.3. Potenciales Evocados Adquiridos

La distribución espacial del potencial evocado auditivo se muestra en la figura VII.3.3.1. En la figura puede apreciarse la distribución típica de los componentes exógenos de un potencial auditivo con una actividad exógena más intensa en las regiones frontales y del vertex. Sin embargo, en contraste con las distribuciones espaciales del primer experimento, en este segundo experimento los componentes endógenos son prominentes en las regiones del vertex y parietal, decrementando su amplitud hacia las regiones frontales y occipitales.

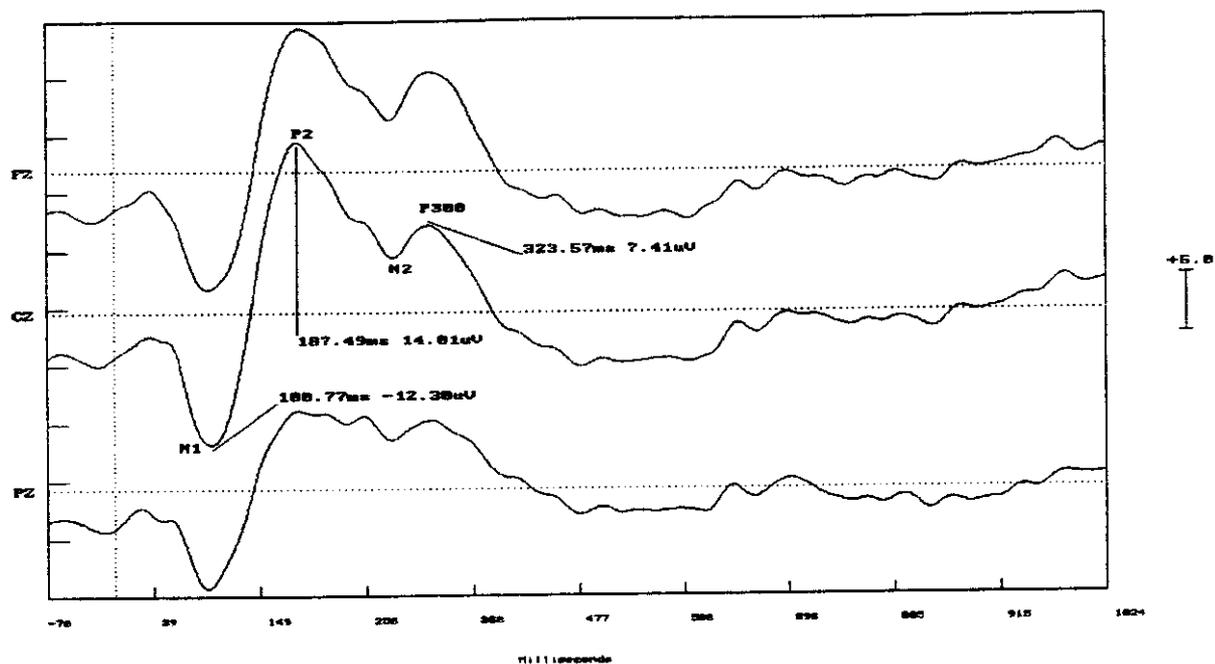


Figura VII.3.3.2. Potencial evocado por un tono de 1000 Hz en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan para el electrodo Cz indicando sus latencias.

El potencial evocado auditivo generado por el tono de 1000 Hz se presenta en la figura

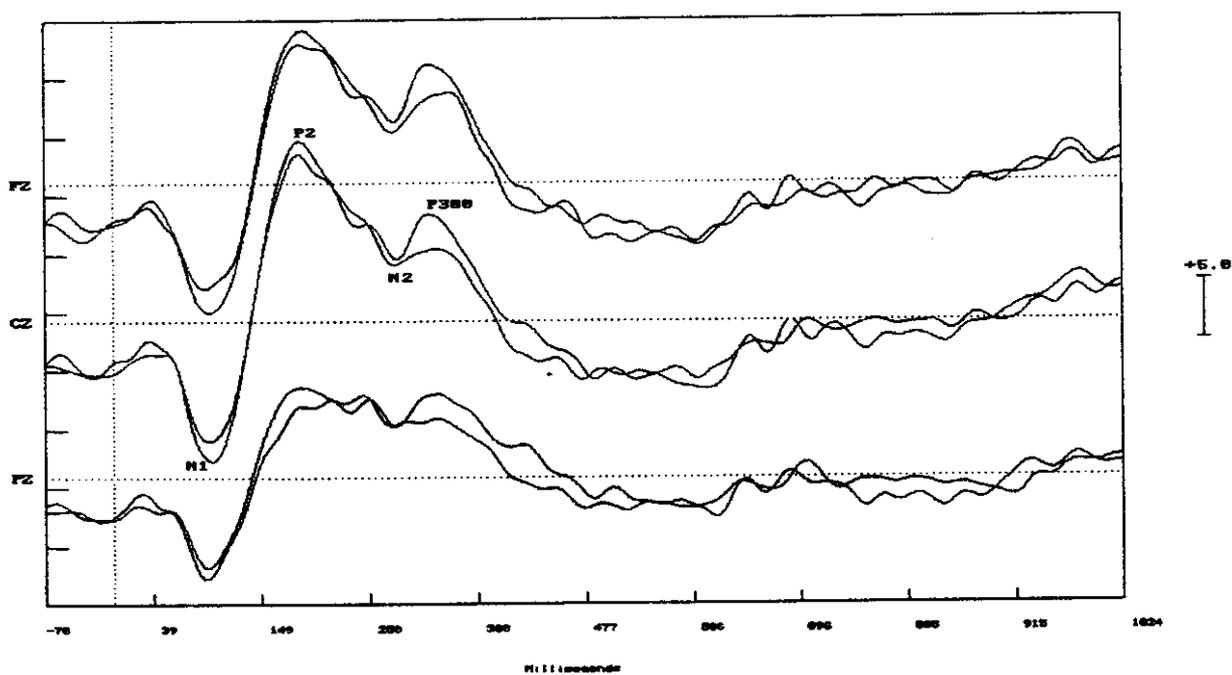


Figura VII.3.3.3. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediando las épocas pares e impares.

VII.3.3.2. Los componentes exógenos N1 y P2 se muestran claramente en la señal adquirida mientras que el componente N2 parece traslapado con el componente endógeno P300. Las latencias de los

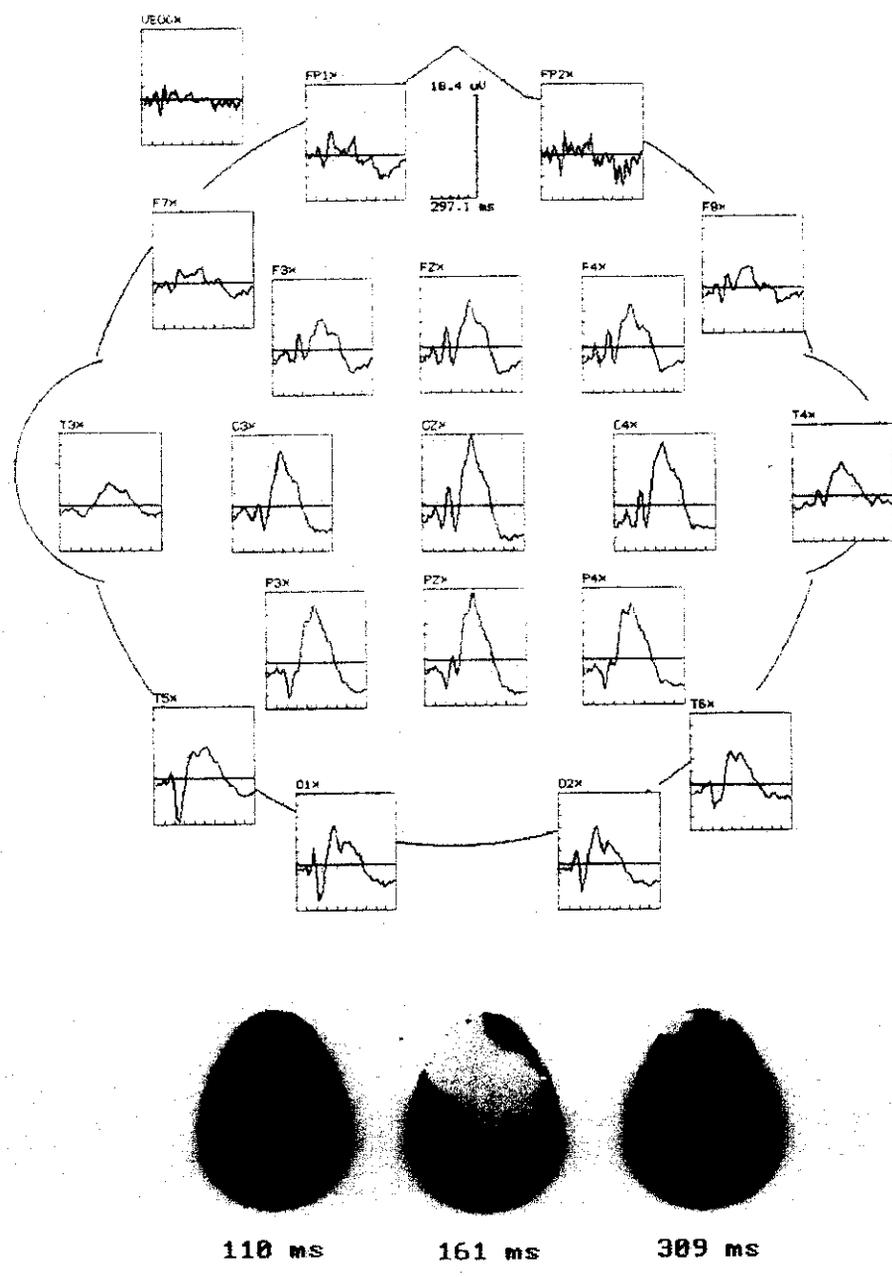


Figura VII.3.3.4. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100, P200 y P300.

componentes exógenos N1 y P2 para el segundo experimento son similares a las latencias de los componentes correspondientes del primer experimento. La amplitud del componente P300 se incrementa en el segundo experimento, este incremento se asocia con el hecho de que al sujeto le es más difícil ignorar el estímulo accesorio en comparación con el primer experimento. En la figura VII.3.3.3 se presenta las réplicas del potencial evocado auditivo, confirmando la reproducibilidad de los diferentes componentes mostrados en la figura VII.3.3.2.

En la figura VII.3.3.4 se muestra la distribución espacial del potencial evocado visual. Como puede observarse, los componentes exógenos son prominentes en las regiones parietales y occipitales del cerebro. En la figura VII.3.3.5 se muestran los componentes exógenos N1, P2 y N2 del potencial evocado visual así como el componente endógeno P300. La actividad eléctrica mostrada corresponde

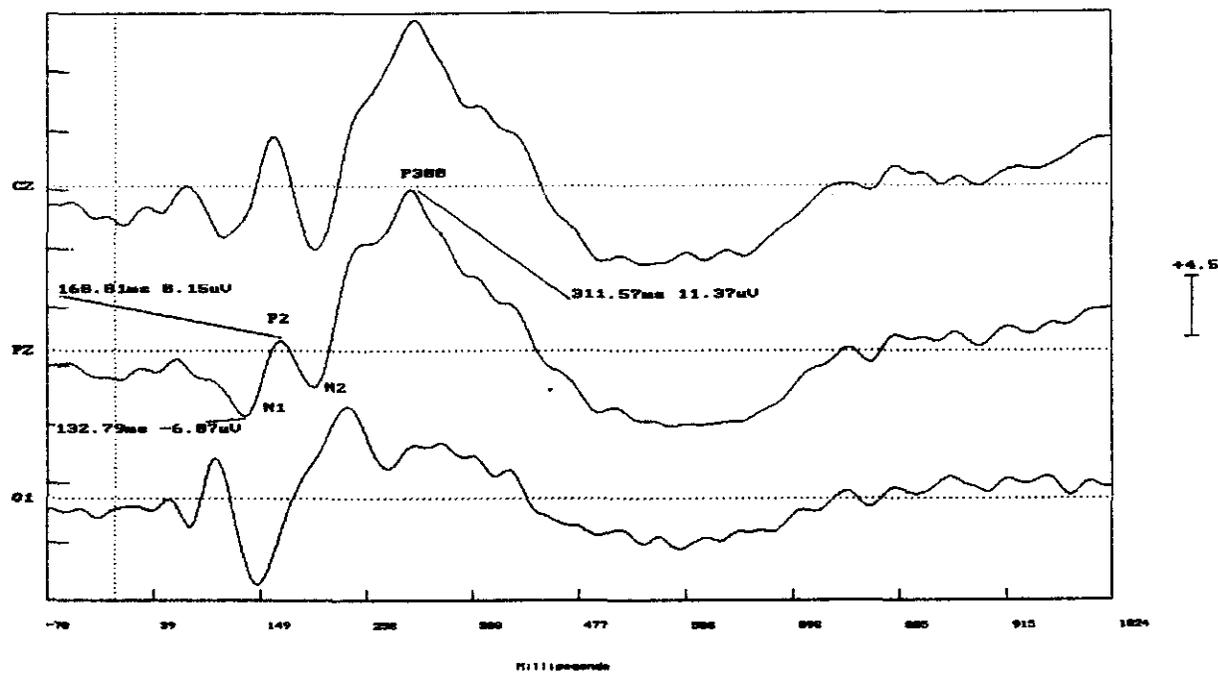


Figura VII.3.3.5. Potencial evocado por un flash de color rojo en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan para el electrodo Pz indicando sus latencias.

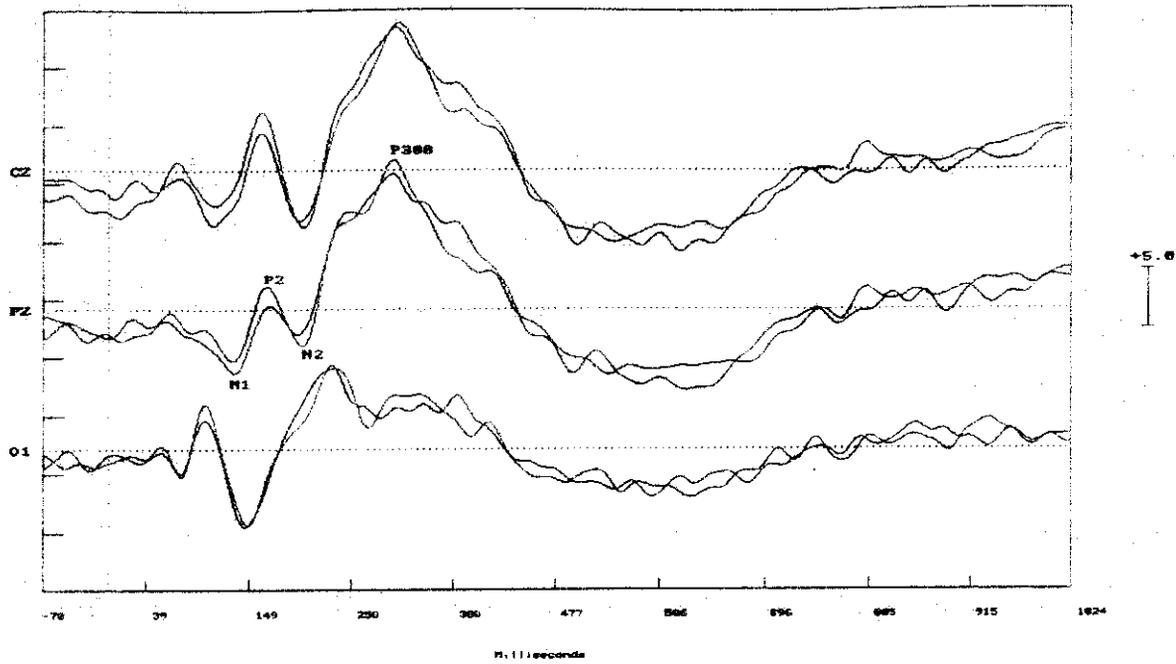


Figura VII.3.3.6. Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

al electrodo Pz. En la figura VII.3.3.6 se muestran las réplicas para el potencial evocado visual confirmando la existencia de cada uno de los componentes descritos en la figura VII.3.3.5. Como puede observarse las latencias de cada uno de los componentes exógenos del segundo experimento

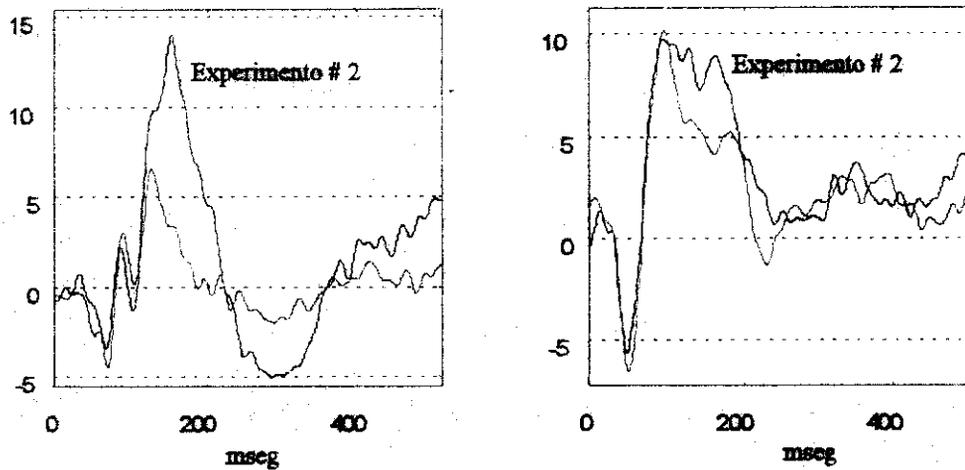


Figura VII.3.3.7. Potenciales evocados visual y auditivo correspondientes al primer y segundo experimento.

son similares a las latencias de los componentes reportados en el primer experimento. Sin embargo, existen cambios en sus amplitudes como puede observarse comparando la amplitud de N1-P2 en

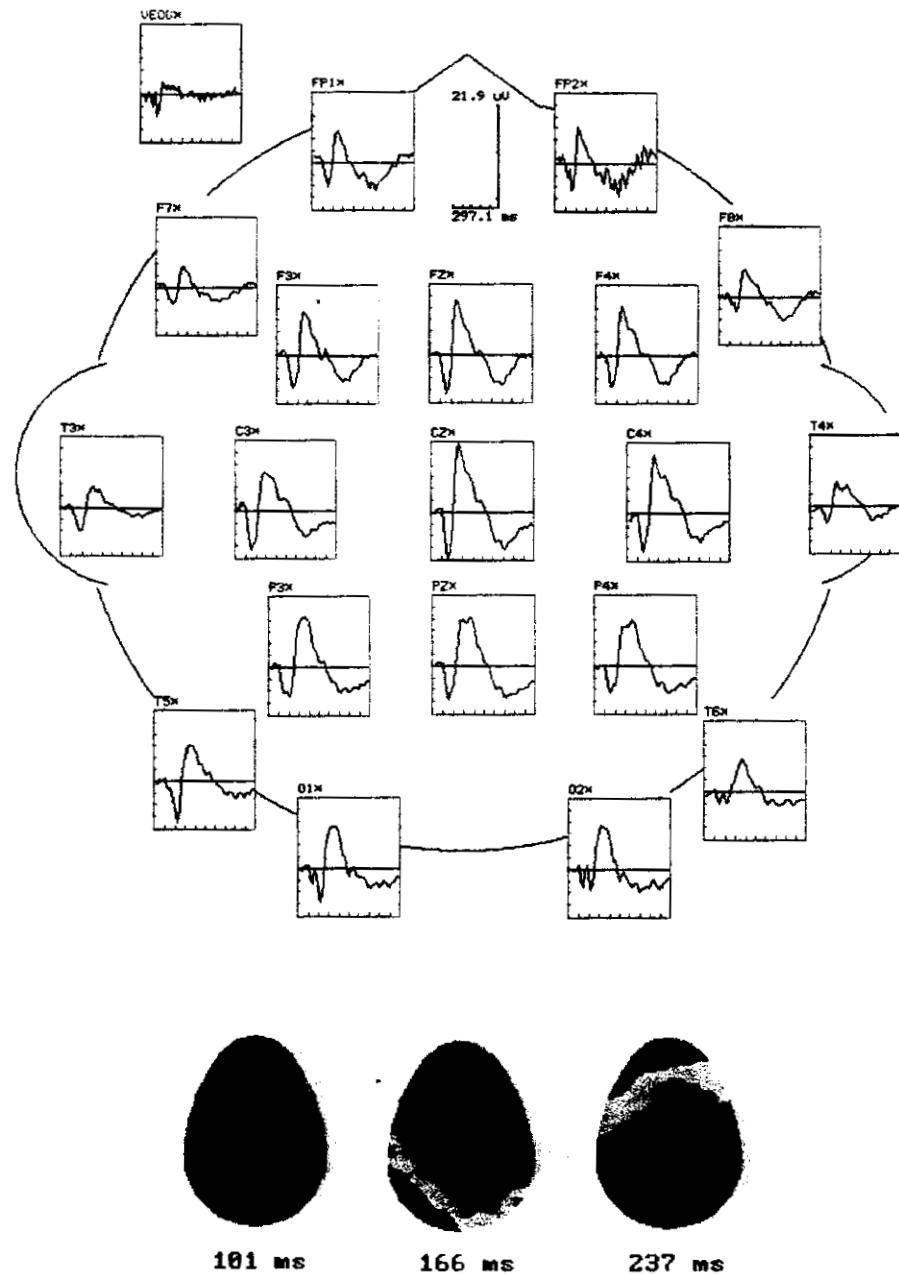


Figura VII.3.3.8. Distribución espacial del potencial evocado bimodal. Los mapas topográficos corresponden a los componentes N100 y P200.

ambos experimentos. Un cambio importante es el observado en el componente P300 en comparación con el componente P300 del primer experimento. La amplitud del componente endógeno es mayor y su inicio se presenta a los 203 milisegundos y finaliza en los 543 milisegundos en comparación con el intervalo de 207 a 360 milisegundos del primer experimento, figura VII.3.3.7 (a). Después de los 543 milisegundos no existe en forma significativa actividad eléctrica del potencial evocado visual.

Las diferencias entre las respuestas evocadas unimodales utilizando estímulos ortogonales sin tarea asignada al sujeto (primer experimento) y con el sujeto respondiendo tan pronto como sea posible al estímulo visual (segundo experimento) se muestran en figuras VII.3.3.7. (a) y (b). Como puede observarse existen pequeños cambios en las respuestas entre 0 y 200 milisegundos. Sin embargo, son evidentes los cambios después de los 200 milisegundos para ambas vías sensoriales, siendo más evidentes para la actividad visual.

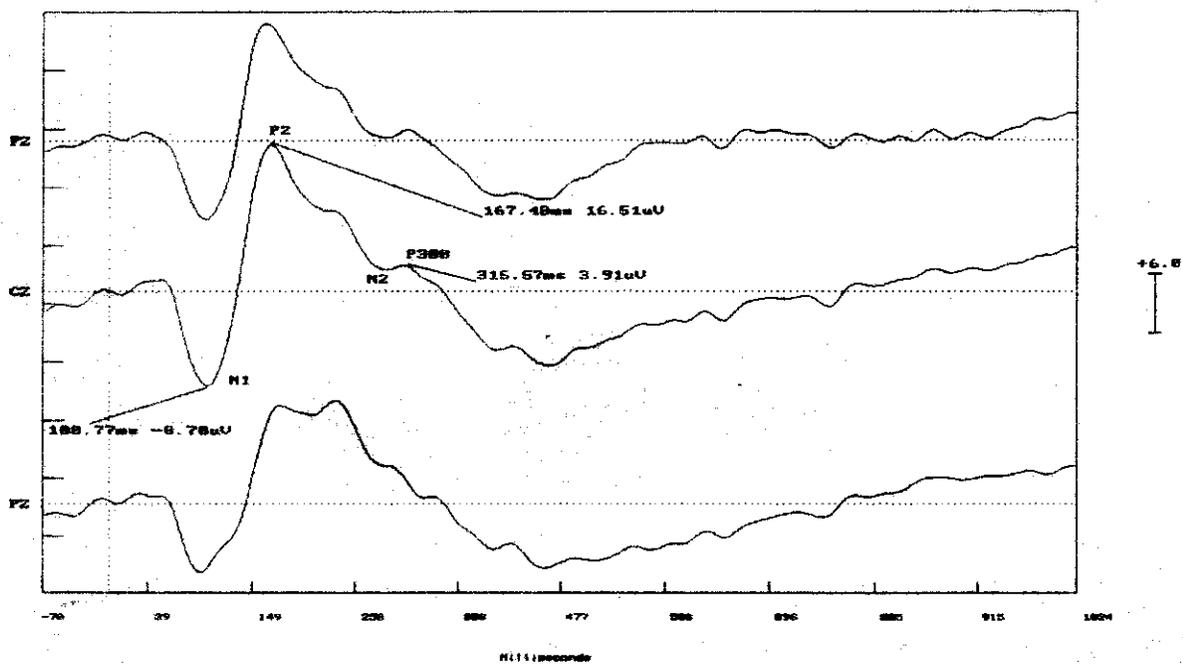


Figura VII.3.3.9. Potencial evocado bimodal obtenido presentando simultáneamente un flash de color rojo y un tono de 1000 Hz.

La distribución espacial del potencial evocado bimodal se muestra en la figura VII.3.3.8. La componente bimodal cognoscitiva P300 muestra una actividad más intensa en las regiones parietales y occipitales. Es evidente la diferencia en actividad cognoscitiva entre el experimento # 1 y experimento # 2, diferencia asociada con la tarea que realiza el sujeto.

El potencial evocado bimodal, con un retraso de cero milisegundos entre los inicios de los estímulos visual y auditivo se presenta en la figura VII.3.3.9. Se puede observar que los componentes N2 y P300 se encuentran traslapados. Además, una nueva onda aparece entre los componentes N2 y P2, posiblemente se genere por la interacción de las vías sensoriales.

Las réplicas del potencial evocado bimodal, mostradas en figura VII.3.3.10, confirman la

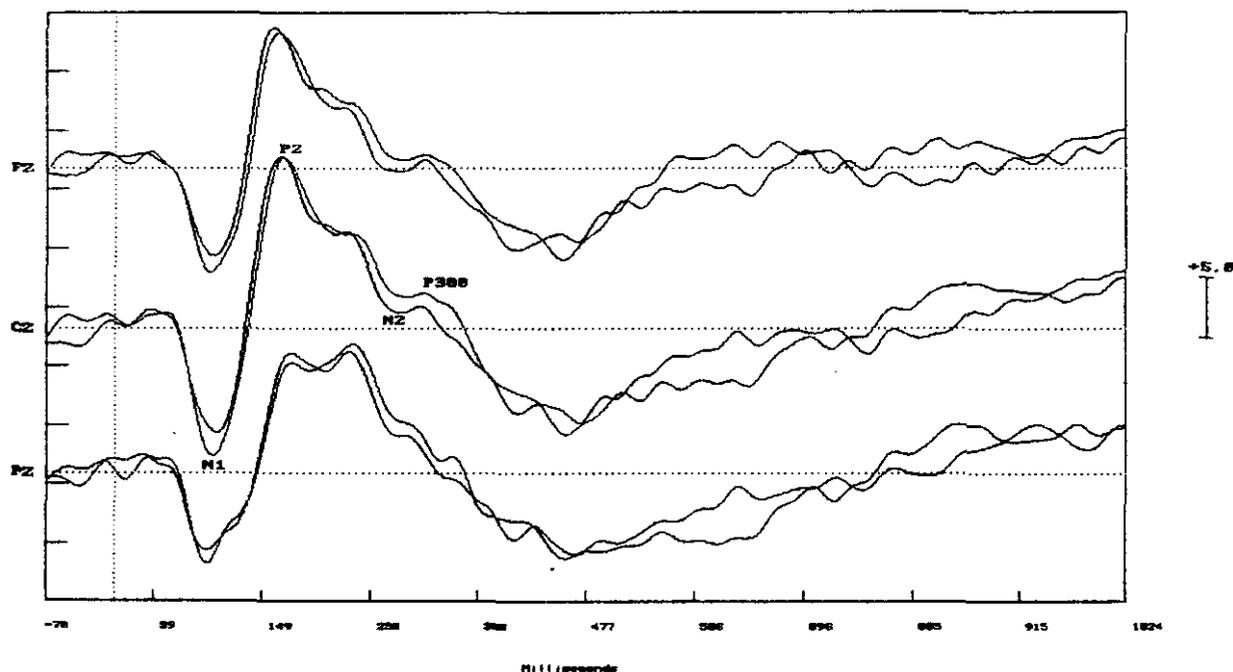


Figura VII.3.3.10. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

reproducibilidad de los componentes N1, P2, N2 y P300 y la reproducibilidad de la nueva onda generada.

El potencial bimodal sintetizado, obtenido por la suma de las actividades unimodales, es muy parecido al potencial evocado bimodal adquirido hasta la latencia correspondiente al componente P200, figura VII.3.3.11. Después del componente P200 existe una diferencia considerable entre los potenciales evocados adquiridos y sintetizados. La respuesta cognoscitiva evidentemente no sigue la simple suma sugiriendo una relación más compleja entre las actividades unimodales.

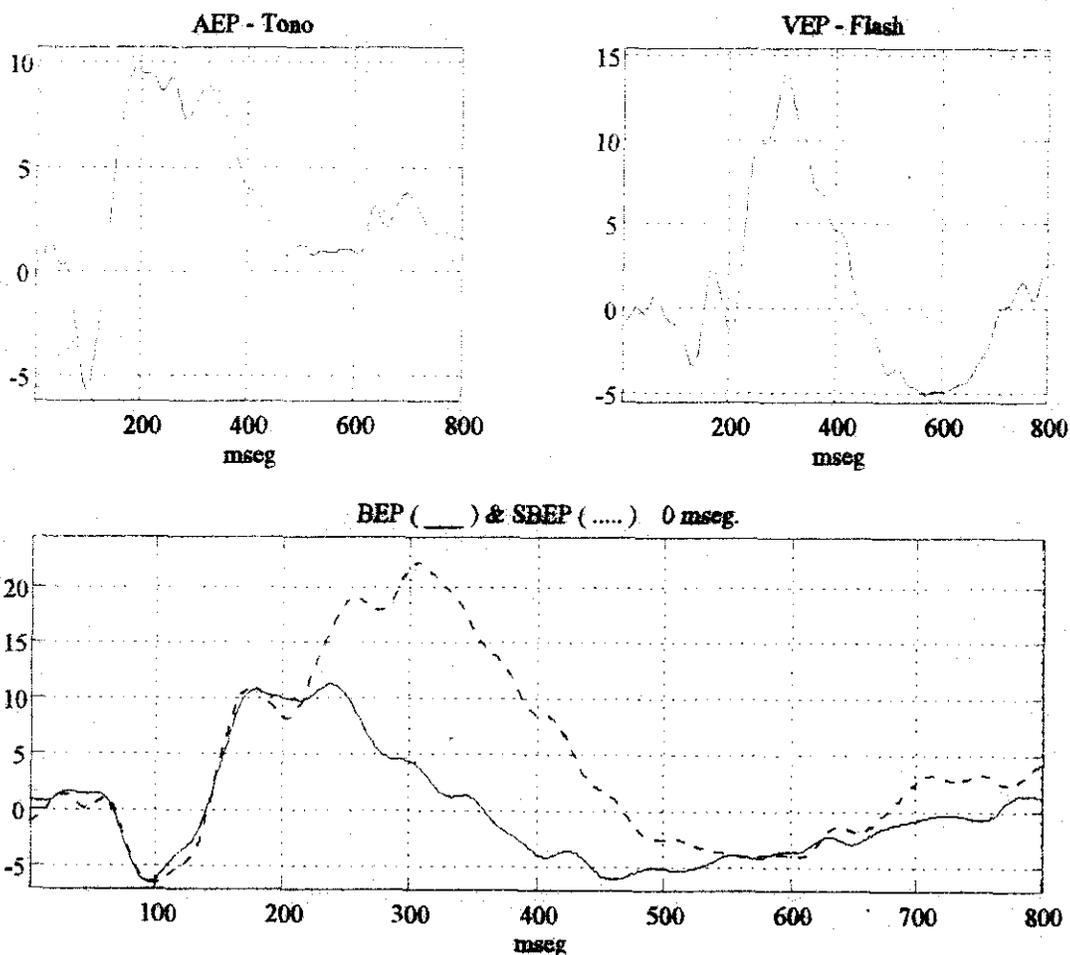


Figura VII.3.3.11. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) Potencial evocado auditivo (AEP) por un tono de 1000 Hz, (b) potencial evocado visual (VEP) por un flash de color rojo, (c) potencial evocado bimodal (BEP) y potencial bimodal sintetizado (SBEP) por un tono de 1000 Hz y un flash de color rojo presentados simultáneamente.

El efecto de retrasar el inicio del estímulo auditivo a partir del inicio del estímulo visual se refleja en un decremento en la amplitud del componente N1 y es dependiente de la cantidad de retraso involucrada, figura VII.3.3.12. También, se producen cambios morfológicos alrededor y después del componente P2, cambios que posiblemente se asocien al traslapamiento de los componentes P300 y N2. Los cambios pueden pensarse que son dependientes de la ocurrencia temporal de la información visual y auditiva. En la condición de 60 milisegundos de retraso la actividad alrededor de los 250 milisegundos es principalmente debida a un solo componente, sin embargo, esta actividad es el resultado de la combinación de la actividad exógena y endógena. La hipótesis es que el sujeto utiliza tanto información cognoscitiva visual y auditiva para generar una decisión bimodal. Los tiempos de reacción para los diferentes valores de retraso se proporcionan en la tabla VII.1. Es importante observar que el tiempo de reacción para la presentación bimodal es menor que el tiempo de reacción

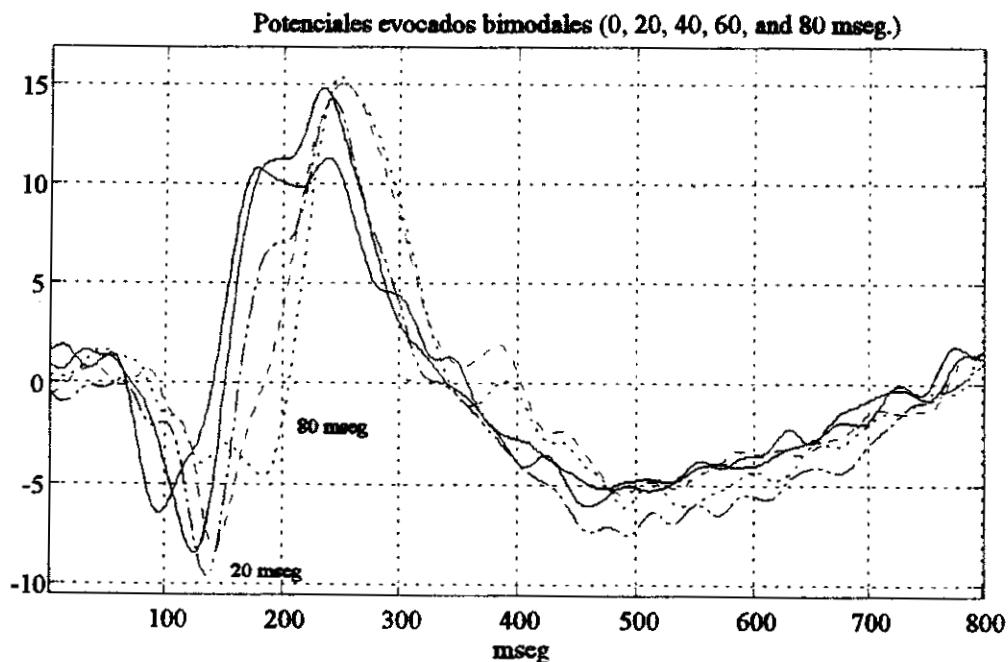


Figura VII.3.3.12. Potenciales evocados bimodales, en electrodo Pz, utilizando diferentes retrasos entre los inicios de los estímulos unimodales.

obtenido para el estímulo visual.

Tabla VII.1. Valor promedio y desviación estándar del tiempo de reacción a diferentes retrasos entre estímulos.		
Tipo	Valor promedio	Desviación estándar
Flash	0.311	0.071
Flash - 0 mseg - Tone	0.227	0.043
Flash - 20 mseg - Tone	0.224	0.055
Flash - 40 mseg - Tone	0.215	0.043
Flash - 60 mseg - Tone	0.202	0.056
Flash - 80 mseg - Tone	0.183	0.038

VII.3.4. Conclusiones

Para entender mejor el fenómeno intersensorial, es importante conocer la contribución de las actividades unimodales en la génesis del potencial evocado bimodal. Los resultados experimentales muestran que el ignorar el estímulo auditivo no significa obtener un potencial evocado bimodal que sea similar, morfológicamente, al potencial evocado visual, sugiriendo que la energía del estímulo auditivo es relevante en los diferentes procesos durante la presentación bimodal. En base a la información proporcionada por los potenciales evocados y la tabla VII.1 parece que la vía sensorial auditiva interactúa con la vía sensorial visual facilitando la decisión del sujeto.

VII.4. Experimento # 3

El tiempo de reacción se ha considerado como un parámetro importante para evaluar las interacciones sensoriales. Sin embargo, sus desventajas como la variabilidad generan la necesidad de investigar información adicional o alternativa. Por ejemplo, la latencia del componente P300 podría representar un índice temporal de la ocurrencia de los eventos cognoscitivos. Su distribución espacial podría estar relacionada con la naturaleza del experimento y su amplitud podría asociarse con el nivel de expectación que representa la tarea asignada al sujeto. En consecuencia, la información proporcionada por el componente P300 podría representar una medida más eficiente que los índices tradicionales conductuales, como el tiempo de reacción (RT).

En el primer experimento no se asignó ninguna tarea al sujeto mientras que en el segundo experimento la tarea consistió en detectar la presencia de un estímulo en una de las vías sensoriales. El tercer experimento utiliza un estímulo relevante dual, es decir, el sujeto necesita presionar un botón cuando ocurre una combinación específica de estimulación auditiva-visual. Con el propósito de evitar que el sujeto pueda generar una estrategia de decisión basada en la selección de un sólo estímulo, es decir, generar la respuesta en función del estímulo más fácil de detectar, la presentación de los estímulos unimodales y bimodales incluyen estímulos distractores ("Catch Stimuli"). El objetivo del experimento es generar una respuesta unimodal más intensa desde el punto de vista cognoscitivo, y en consecuencia, un proceso bimodal más intenso. Los puntos específicos a investigar son: (a) estudio de los cambios en los componentes exógenos debido a un proceso de categorización más complejo de los estímulos, (b) estudio de las diferencias temporales de los componentes P300 de la actividad unimodal y bimodal y (c) estudio del efecto de retrasar 80 milisegundos el inicio del estímulo auditivo

con respecto al inicio del estímulo visual.

VII.4.1. Objetivo

Estudio del fenómeno intersensorial cuando una combinación de estímulos ortogonales visual y auditivo se establece como relevante.

VII.4.2. Método

Estímulos

- Estímulos Unimodales: Tono y flash. El tono se presenta en forma binarual a través de audifonos insertables mientras que el flash se presenta como un círculo de color al centro de la pantalla de un monitor de computadora de 17 pulgadas. Existen cuatro condiciones de estimulación unimodal: el estímulo auditivo consiste de tonos de 1000 y 1100 Hz mientras que el estímulo visual se conforma de un flash de color rojo y un flash de color azul.
- Estímulos Bimodales: Las diferentes combinaciones de estimulación bimodal se forman como sigue: flash de color rojo & tono de 1100 Hz, flash de color azul & tono de 1100 Hz, flash de color rojo & tono de 1000 Hz y flash de color rojo- Δt -tono de 1100 Hz, en donde $\Delta t=80$ milisegundos.
- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con igual probabilidad de ocurrencia. En cada época se le presenta al sujeto un estímulo unimodal o bimodal.
- Intervalo entre Estímulos: de 2 a 3 segundos, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Tono: Tonos de 1000 y 1100 Hz con 60 milisegundos de duración, tiempo de subida y de bajada de 10 milisegundos e intensidad de 80 dB.
- Flash: Flash de color rojo y azul con 60 milisegundos de duración presentado al centro de un monitor de computadora, utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- Número de épocas: 800 épocas con 100 estímulos de cada tipo.
- Frecuencia de muestreo: 500 Hz
- Número de muestras: 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- Duración de cada época: 1094 milisegundos
- Número de canales: 20
- Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.
- Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.

Tarea

El sujeto necesita oprimir un botón cuando el estímulo flash de color rojo y el tono de 1100 Hz se presentan en forma aislada o en forma combinada, y evitar generar una respuesta ante la presencia de cualquier otro tipo de estímulo. Al sujeto se le solicita fijar la vista en la pequeña cruz que se presenta, entre estimulación visual, a la mitad de la pantalla.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo. Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto; sus localizaciones estan de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por

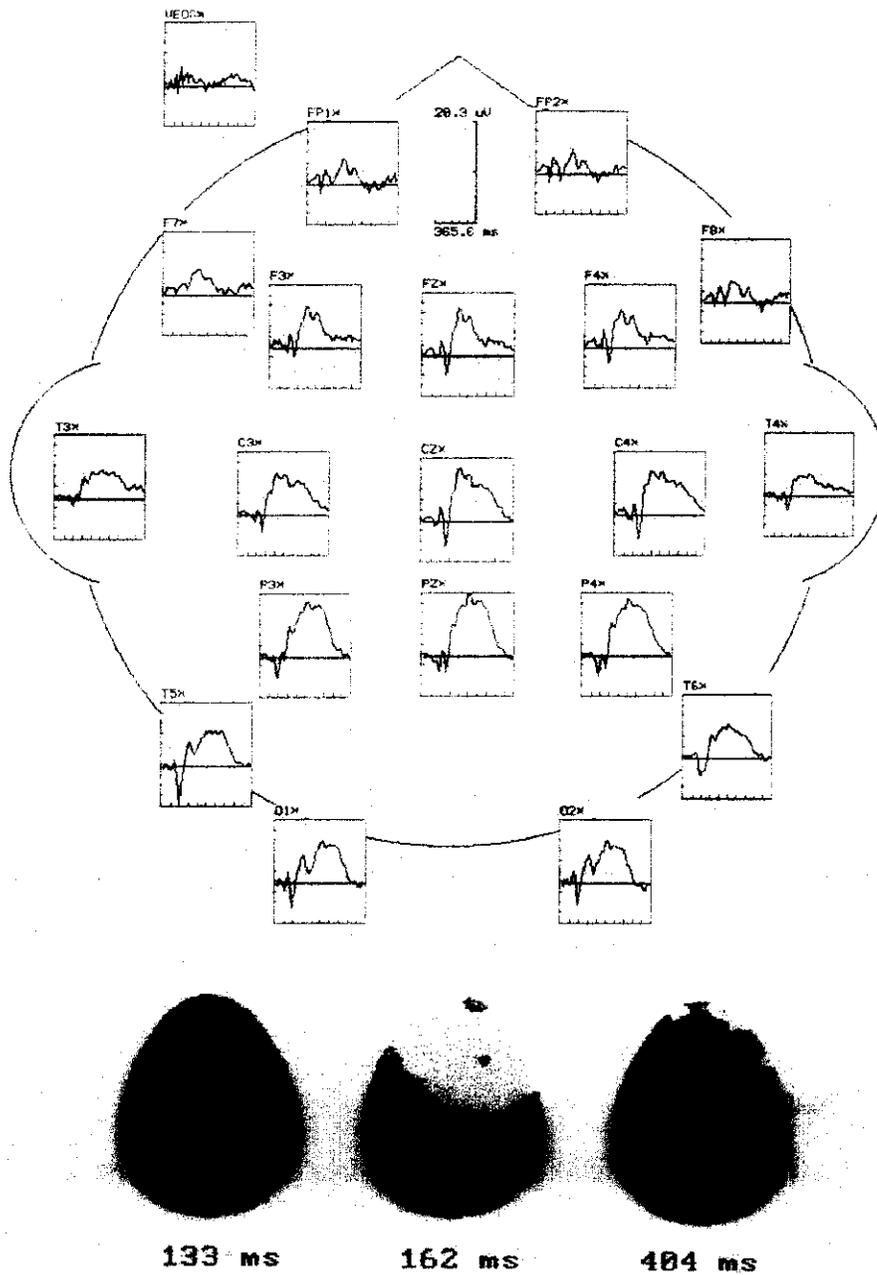


Figura VII.4.3.1. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijandose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las

diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que están contaminadas con movimiento ocular.

VII.4.3. Potenciales Evocados Adquiridos

En la figura VII.4.3.1 se muestra la distribución espacial del potencial evocado visual. Como puede observarse se genera un proceso cognoscitivo, indexado por la P300, con una amplitud considerable y de mayor duración en comparación con los experimentos anteriores. En la figura VII.4.3.2 se muestra con mayor detalle el potencial evocado por el estímulo visual relevante que corresponde a un flash de color rojo. En la figura puede apreciarse que los componentes exógenos N1 y P2, así como el componente endógeno N2, presentan latencias similares a los componentes correspondientes en los experimentos anteriores. Sin embargo, algunas discrepancias son evidentes, la diferencia en amplitud N1-P2 es menor que la diferencia de la amplitud obtenida en el primer y

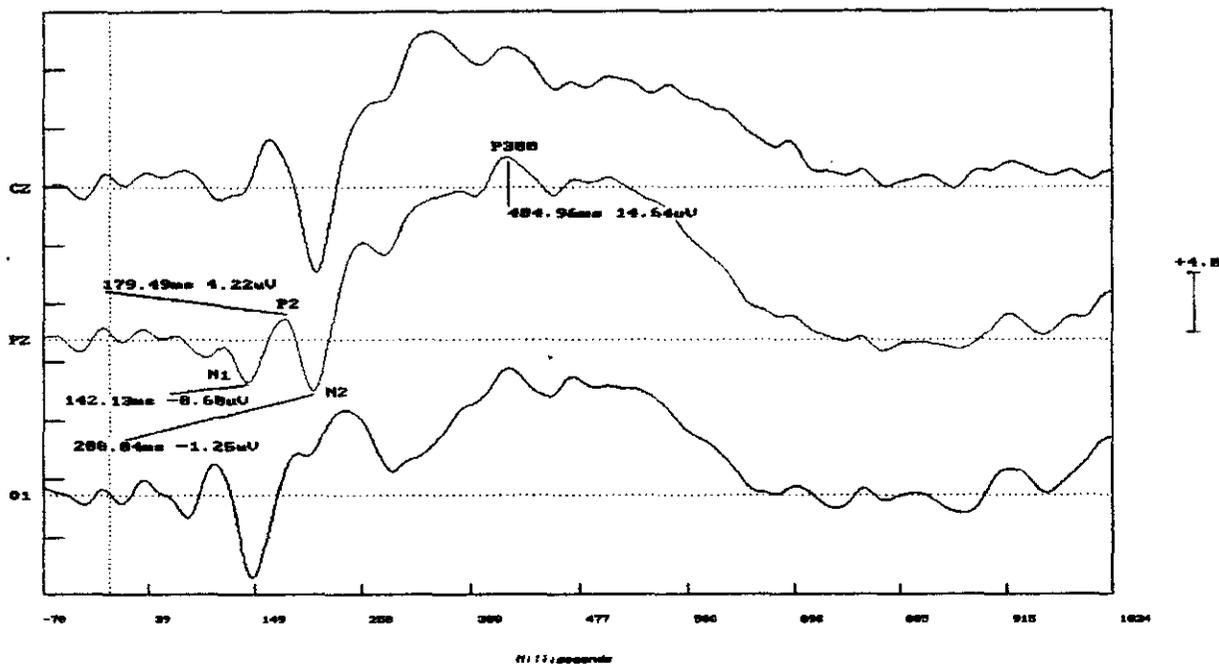


Figura VII.4.3.2. Potencial evocado visual por un flash de color rojo en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Pz.

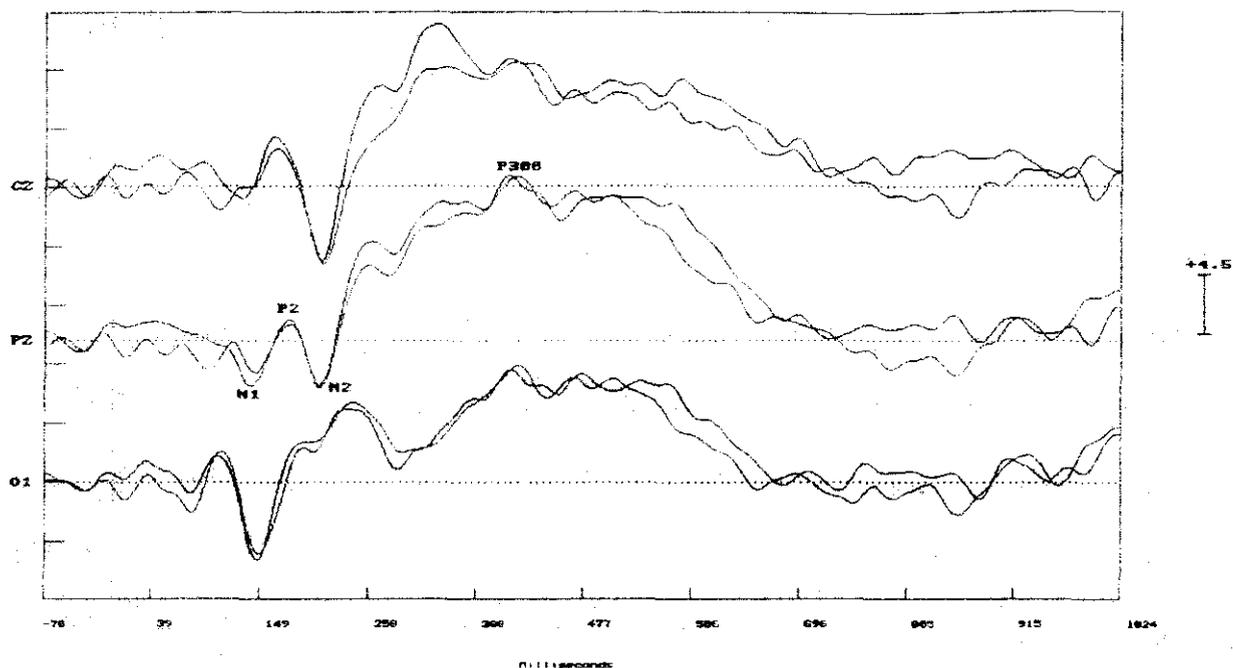


Figura VII.4.3.3. Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

segundo experimento mientras que la diferencia de amplitud P2-N2 es mayor. Es posible que los procesos exógenos y endógenos interactúen desde la latencia del componente N100. Por otra parte, el componente cognoscitivo P300 inicia en los 208 milisegundos, considerando como punto de inicio la latencia del componente N200, y termina en los 737 milisegundos con un pico principal alrededor de los 404 milisegundos. Es importante notar que el componente P300 presenta una morfología más compleja en comparación con la obtenida en los experimentos anteriores. Las réplicas del potencial evocado visual se presentan en la figura VII.4.3.3 y confirman la existencia de cada uno de los componentes descritos.

La distribución espacial del potencial evocado auditivo por el tono de 1100 Hz se muestra en la figura VII.4.3.4. Los componentes exógenos presentan la distribución fronto-central típica de la actividad auditiva, mientras que el comportamiento del componente P300 se enfatiza mostrando su

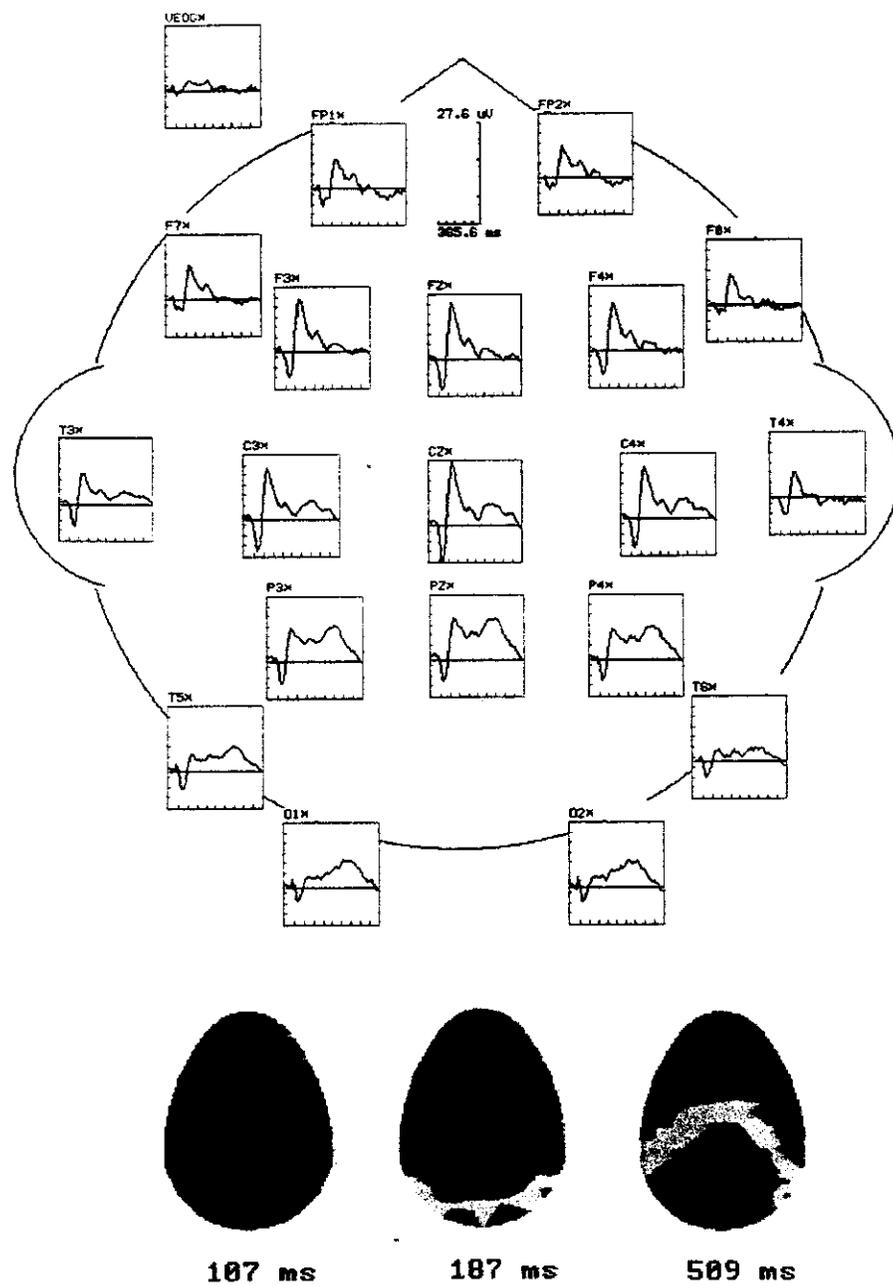


Figura VII.4.3.4. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

distribución típica localizada en la zona occipital.

Los detalles de la morfología del potencial evocado por el tono de 1100 Hz, estímulo

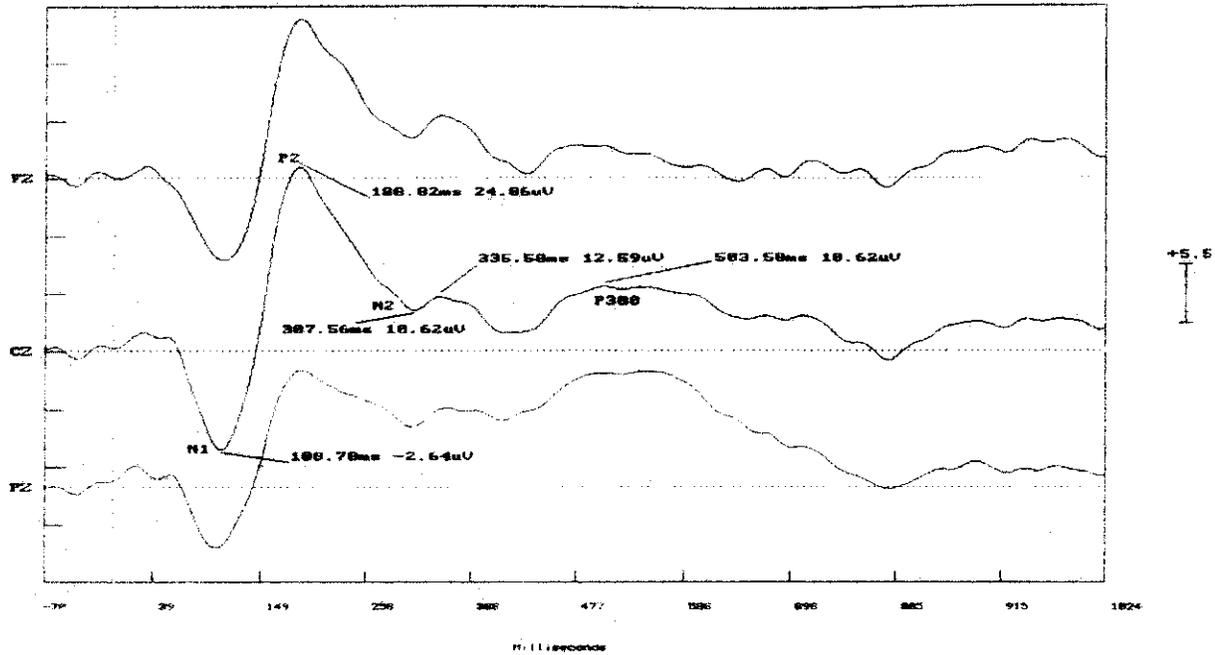


Figura VII.4.3.5. Potencial evocado auditivo por un tono de 1100 Hz en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Cz, indicando sus latencias.

relevante, se presentan en la figura VII.4.3.5. Las latencias de los componentes N1 y P2 son similares

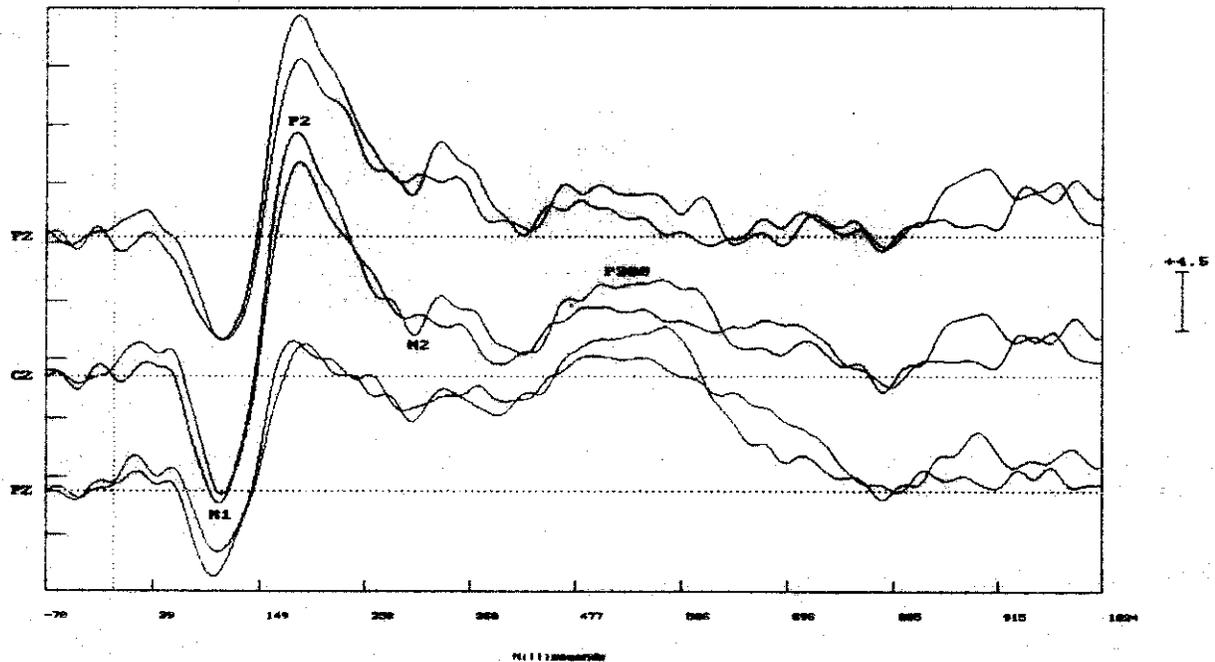


Figura VII.4.3.6. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediandolas épocas pares e impares.

a las obtenidas en el primer y segundo experimento. Sin embargo, es importante observar que la pendiente de bajada del componente P2 es diferente, pareciera que el proceso endógeno de

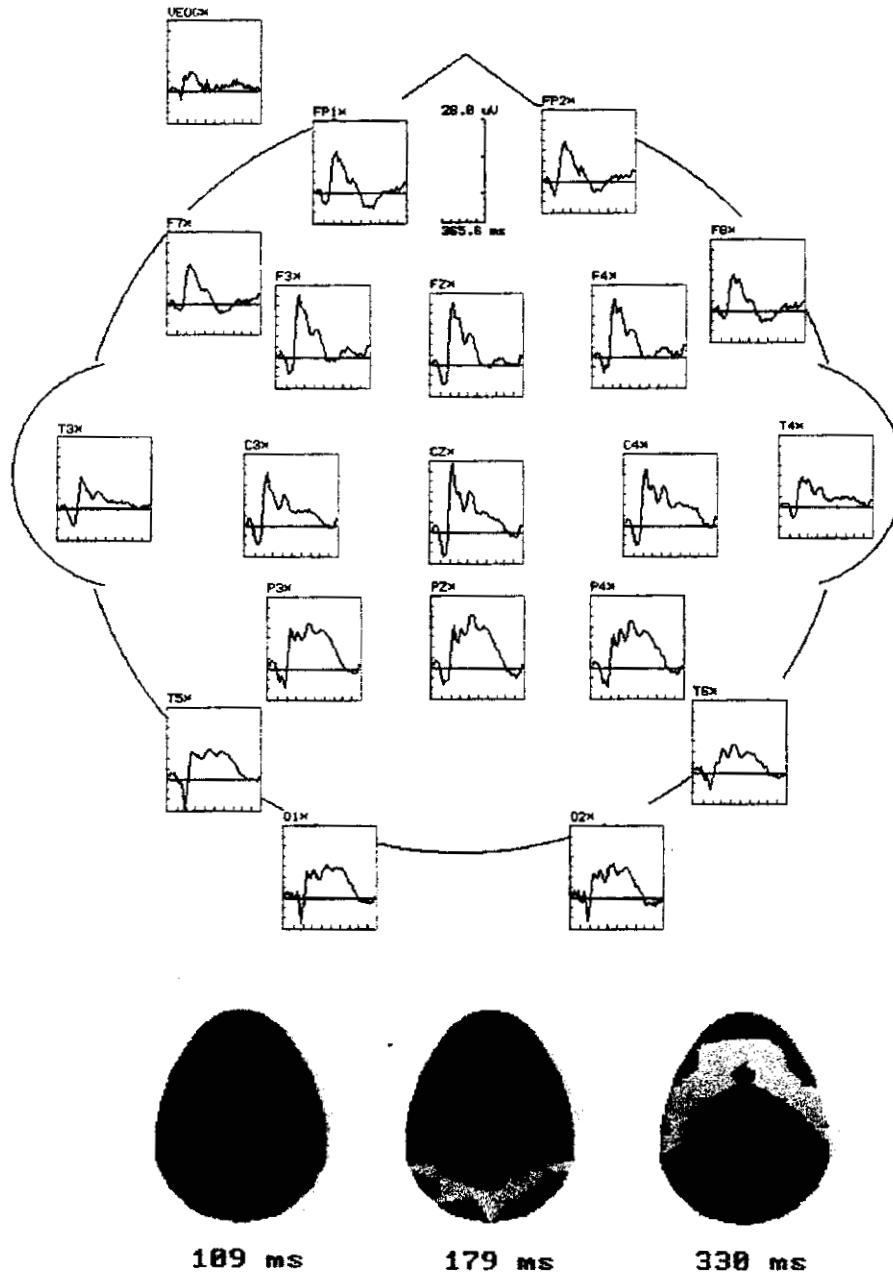


Figura VII.4.3.7. Distribución espacial del potencial evocado bimodal . Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

categorización del estímulo auditivo intereclúa con los componentes exógenos N1 y P2, interacción dependiente de la dificultad de la tarea asignada al sujeto. El componente P300 inicia su actividad alrededor de los 400 milisegundos y termina en los 700 milisegundos con una amplitud máxima en los 503 milisegundos. Las réplicas del potencial evocado auditivo, mostradas en la figura VII.4.3.6, confirman la reproducibilidad de los diferentes componentes del potencial evocado auditivo.

La distribución espacial del potencial evocado bimodal se muestra en la figura VII.4.3.7. El componente bimodal cognoscitivo muestra la distribución típica, es decir, se concentra en la región parietal y decrementa su amplitud hacia la parte frontal del cerebro. En la figura VII.4.3.8 se observan los componentes N1 y P2 con sus latencias comparables con las latencias de los experimentos anteriores. Sin embargo, ocurren cambios morfológicos relevantes en los componentes N1, P2 y P300. El componente bimodal N1, en el electrodo Pz, se divide en dos formas de onda que

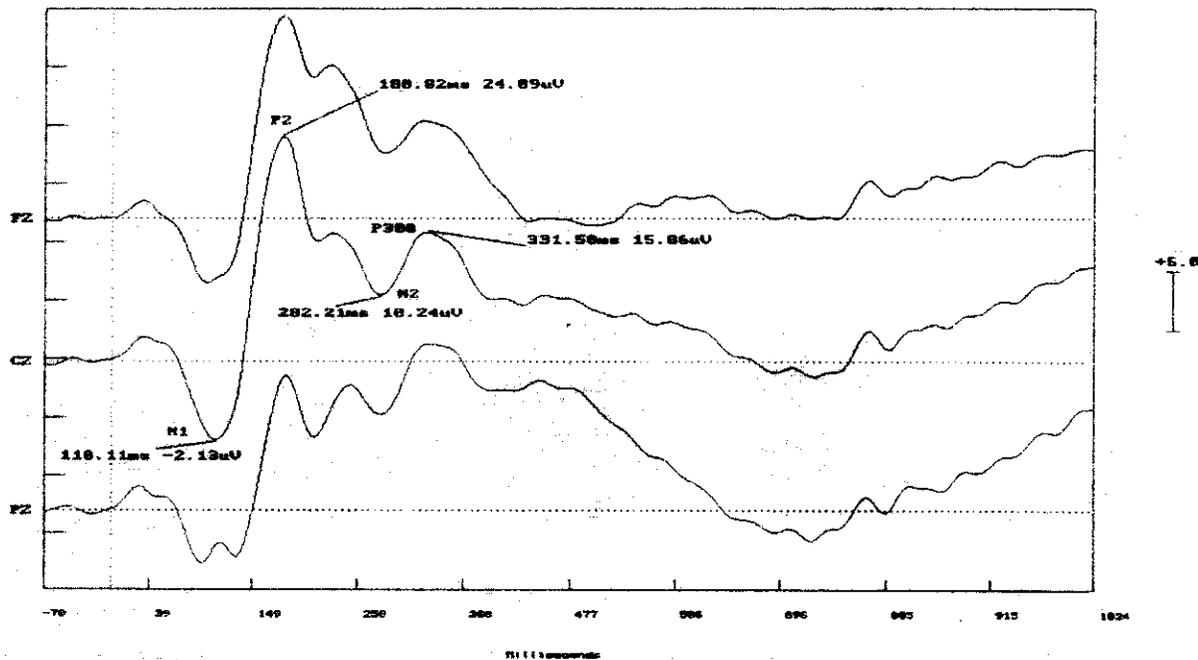


Figura VII.4.3.8. Potencial evocado bimodal generado por la presentación simultánea de un flash de color rojo y un tono de 1100 Hz.

posiblemente esten relacionadas con el proceso de detección de los estímulos visual y auditivo. En el electrodo Cz, el potencial evocado bimodal presenta una morfología bien definida alrededor de los 234 milisegundos, entre los componentes P2 y N2. Esta forma de onda posiblemente este relacionada con el proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual. El proceso de cierre del potencial evocado bimodal, indexado por el componente P300, presenta una amplitud mayor, alrededor de los 331 milisegundos, en comparación con la amplitud obtenida en los experimentos anteriores. Las réplicas del potencial evocado bimodal se muestran en la figura VII.4.3.9 y verifican la reproducibilidad de los componentes antes mencionados.

La combinación de los estímulos visuales y auditivos generan cuatro diferentes potenciales evocados bimodales, figura VII.4.3.10. Como puede observarse, en los potenciales evocados bimodales existen cambios morfológicos importantes tanto en la actividad exógena como en la

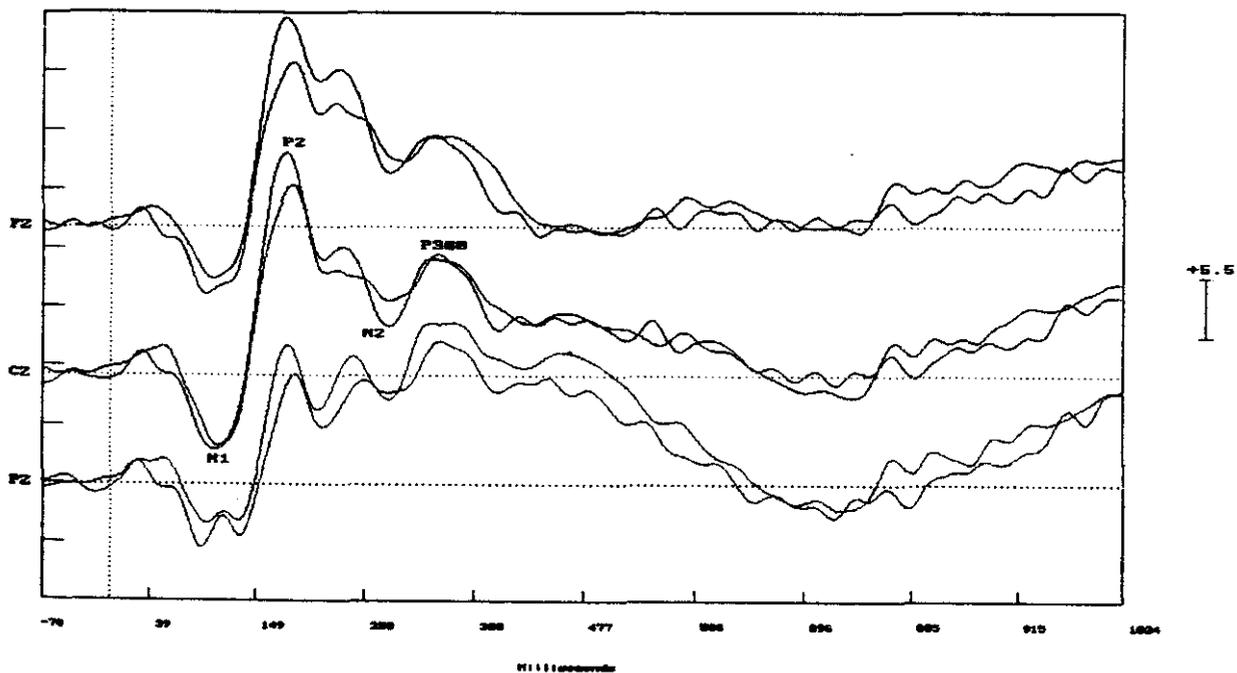


Figura VII.4.3.9. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

actividad endógena. El efecto de división del componente N100 es más marcado en la condición bimodal relevante con estimulación simultánea y con un retraso de 80 milisegundos entre la presentación de los estímulos. La condición bimodal flash de color azul-tono de 1100 Hz genera la mayor amplitud del componente N100. También puede observarse la dependencia del componente P300 con la tarea asignada al sujeto, su amplitud es mayor para la combinación bimodal correspondiente al estímulo "target". Las actividades bimodales mostradas en la figura VII.4.3.10

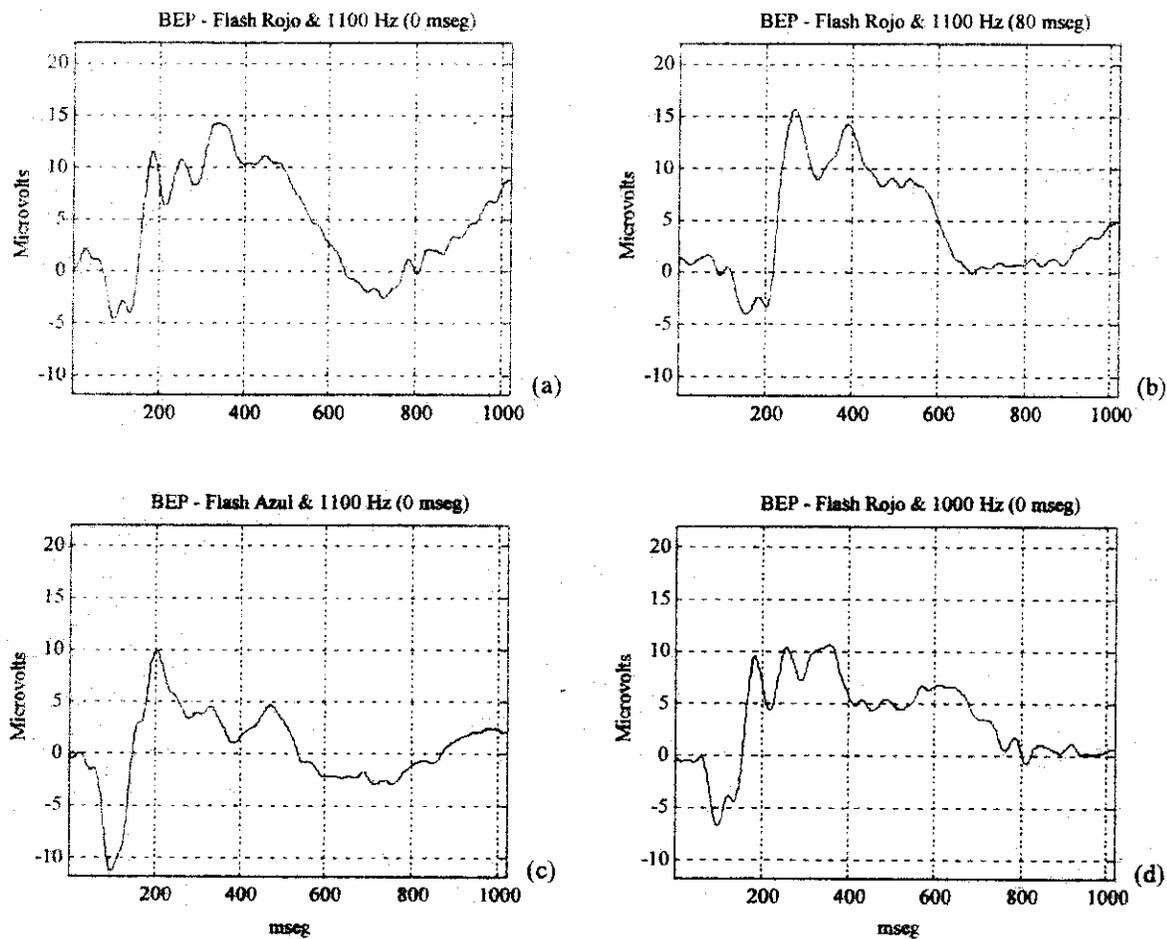


Figura VII.4.3.10. Potenciales evocados bimodales adquiridos. El sujeto presiona un botón en las condiciones experimentales (a) y (b) y evita generar una respuesta en las condiciones (c) y (d). Los potenciales evocados corresponden al electrodo Pz.

sugieren que relaciones diferentes intersensoriales se presentan durante el experimento. Aparentemente, estímulos bimodales etiquetados como "non-target" requieren procesos cognoscitivos diferentes.

El potencial evocado bimodal adquirido (BEP) y el potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP), obtenido por la suma de los potenciales unimodales correspondientes, se muestran en la

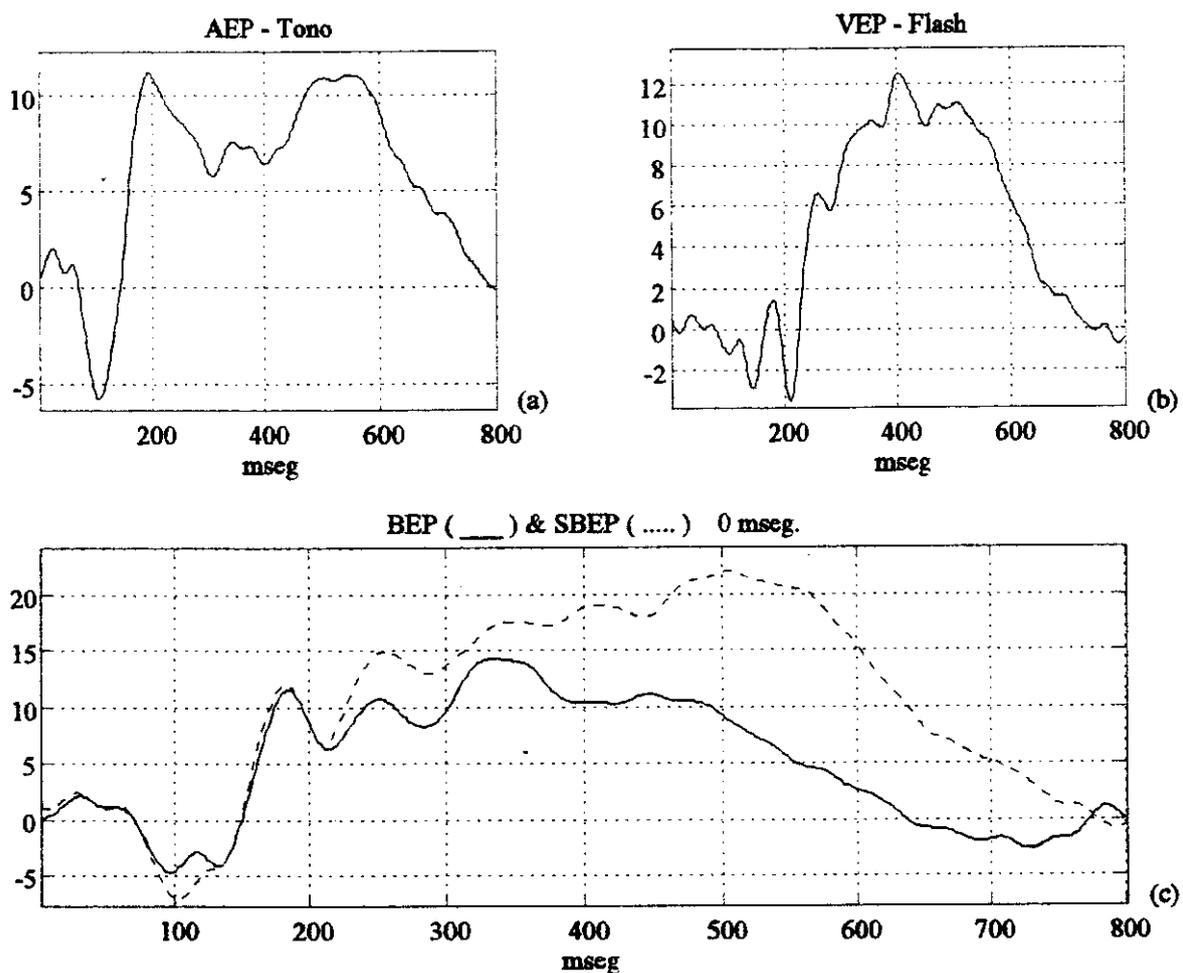


Figura VII.4.3.11. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) potencial evocado auditivo (AEP) generado por un tono de 1100 Hz, (b) potencial evocado visual (VEP) generado por un flash de color rojo, (c) potencial evocado bimodal (BEP) y potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP) con estimulación simultánea.

figura VII.4.3.11(c) para el electrodo Pz. El potencial evocado adquirido decrementa su amplitud rápidamente después de los 400 milisegundos, mientras que el SBEP predice una actividad cognoscitiva importante y de mayor duración, con una actividad máxima alrededor de los 500 milisegundos. Lo anterior, puede interpretarse como que el sujeto toma menos tiempo en generar su decisión en la condición de estimulación bimodal en comparación con el tiempo que toma en estimulación unimodal. El proceso de cierre bimodal termina antes que cualquiera de los procesos de cierre de los potenciales unimodales. Lo anterior puede apoyarse por el tiempo de reacción más corto para estimulación bimodal en comparación con los tiempos de reacción unimodales, Tabla VII.4.1.

TABLA VII.4.1.
Valor Promedio y Desviación Estándar del Tiempo de
Reacción Unimodales y Bimodales.

Tipo	Valor promedio	Desviación estándar
Flash	0.555	0.083
Tono	0.614	0.069
Flash - 0 mseg - Tono	0.514	0.078
Flash - 80 mseg - Tono	0.493	0.086

VII.4.4. Conclusiones

La dificultad de la tarea asignada al sujeto en el tercer experimento origina diferentes y más complejas morfologías cognoscitivas, en comparación con las generadas en el primer y segundo experimento. La suma de los potenciales evocados unimodales predice un actividad cognoscitiva

importante en latencias tardías, que no se presenta en el potencial evocado bimodal adquirido, sugiriendo un proceso de cierre más lento. Es importante notar que las combinaciones de estímulos del presente experimento, con igual probabilidad de ocurrencia, generan diferentes procesos cognoscitivos. En otras palabras, los procesos cognoscitivos están relacionados con la dificultad que presenta la tarea que se le asigna al sujeto. Además, el tiempo de reacción para el estímulo bimodal "target" es menor que el tiempo de reacción para los estímulos unimodales. Los hallazgos anteriores indican posibles interacciones entre las vías sensoriales auditiva y visual.

VII.5. Experimento # 4

El cuarto experimento analiza la relación entre los componentes exógenos y endógenos de los potenciales evocados unimodales y bimodales en condiciones de baja discriminabilidad de los estímulos. En el experimento es necesario que el sujeto identifique una combinación particular del estímulo visual y del estímulo auditivo, el sujeto necesita presionar un botón ante la presencia de una estimulación bimodal específica. Los atributos de los estímulos auditivos y visuales intencionalmente se seleccionan muy cercanos, el estímulo auditivo consiste de un tono de 1060 Hz y un tono de 1100 Hz. Con el propósito de evitar que el sujeto genere una estrategia para detectar el estímulo "target" se incluyen estímulos distractores. En el presente experimento, los puntos específicos a ser estudiados son los siguientes: a) estudio de los cambios de los componentes exógenos debido a un proceso de categorización de estímulos más complejo, b) estudio de las diferencias temporales entre los componentes P300 del potencial evocado bimodal y potenciales evocados unimodales y c) estudio del efecto de retrasar 80 milisegundos el inicio del estímulo auditivo con respecto al inicio del estímulo visual.

VII.5.1. Objetivo

Estudio del fenómeno de interacción sensorial mediante el análisis de los potenciales evocados unimodales y bimodales en condiciones de baja discriminabilidad de los estímulos.

VII.5.2. Método

Estímulos

- **Estímulos Unimodales:** Tono y flash. El tono se presenta en forma binaural a través de

audífonos insertables mientras que el flash se presenta como un círculo de color al centro de la pantalla de un monitor de computador de 17 pulgadas. Existen cuatro condiciones de estimulación unimodal: el estímulo auditivo consiste de un tono de 1060 y 1100 Hz mientras que el estímulo visual se conforma por un flash de color rojo y un flash de color naranja.

- Estímulos Bimodales: Las diferentes combinaciones de estimulación bimodal se forman como sigue: flash de color rojo & tono de 1100 Hz, flash de color naranja & tono de 1100 Hz, flash de color rojo & tono de 1060 Hz y flash de color rojo- Δt -tono de 1100 Hz, en donde $\Delta t=80$ milisegundos.
- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con igual probabilidad de ocurrencia.
- Intervalo entre Estímulos: de 2 a 3 segundos, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Tono: Tonos de 1060 y 1100 Hz con 60 milisegundos de duración, tiempo de subida y de bajada de 10 milisegundos e intensidad de 80 dB.
- Flash: Flash de color rojo y naranja con 60 milisegundos de duración presentado al centro de un monitor de computadora utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- Número de épocas: 800 épocas con 100 estímulos de cada tipo.
- Frecuencia de muestreo: 500 Hz

- Número de muestras: 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- Duración de cada época: 1094 milisegundos
- Número de canales: 20
- Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.
- Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.

Tarea

Oprimir un botón cuando se presenten en forma aislada o simultánea el estímulo visual de color rojo y/o el estímulo auditivo de 1100 Hz, evitando generar una respuesta ante la presencia de cualquier otro estímulo. Al sujeto se le solicita fijar la vista en la pequeña cruz que se presenta, entre estimulación visual, a la mitad de la pantalla.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo. Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto; sus localizaciones estan de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por

abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijandose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las

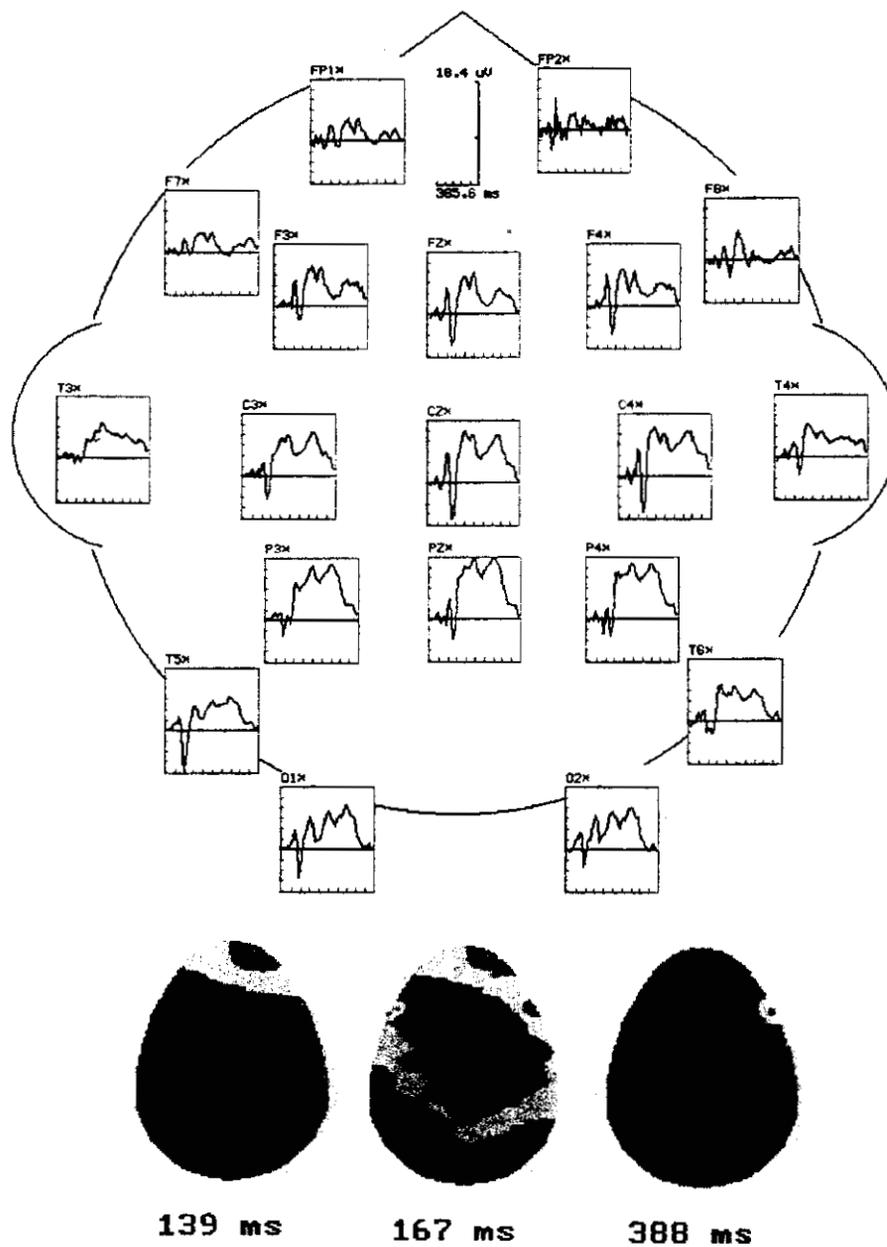


Figura VII.5.3.1. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que están contaminadas con movimiento ocular.

VII.5.3. Potenciales Evocados Adquiridos

En la figura VII.5.3.1 se muestra la distribución espacial del potencial evocado visual. En comparación con el tercer experimento se puede observar que los componentes N100 y P200 son modificados por el proceso cognoscitivo, proceso que está relacionado con la dificultad del experimento. El componente P300 conserva su distribución típica, concentrando su efecto en la zona parietal.

En la figura VII.5.3.2 se muestra el potencial evocado correspondiente al estímulo "target", flash de color rojo. La morfología del potencial es similar a la obtenida en el tercer experimento, sin embargo, los componentes N100, P200, N200 y P300 presentan cambios importantes en su latencia

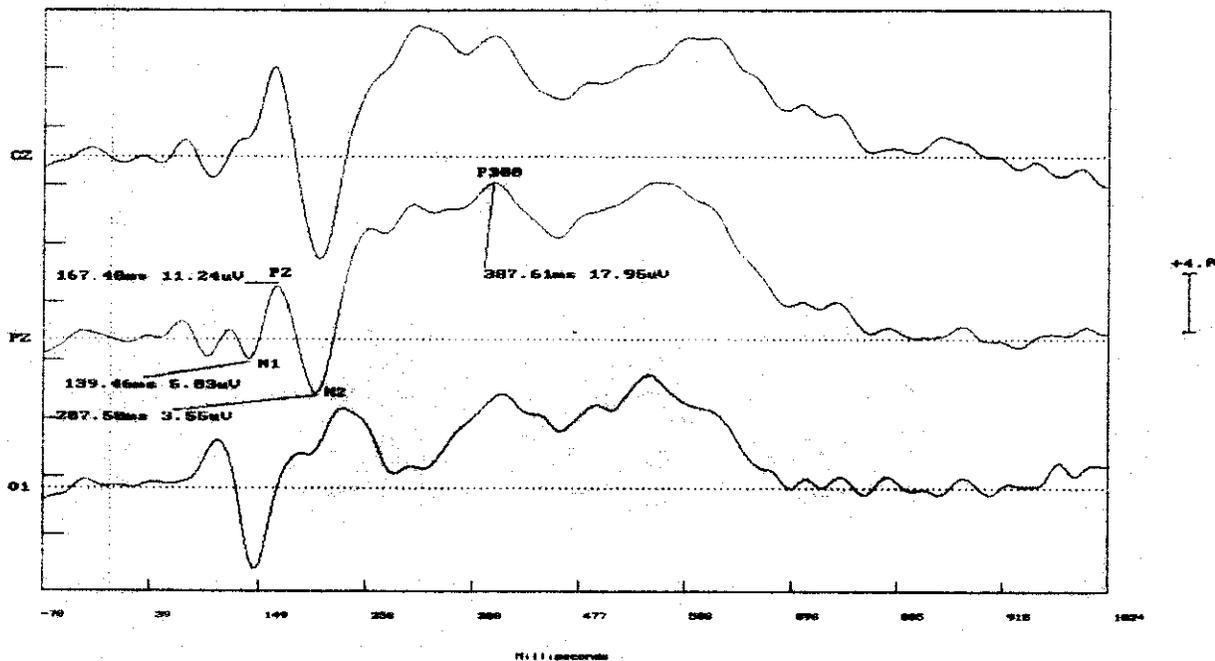


Figura VII.5.3.2. Potencial evocado visual por un flash de color rojo en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Pz.

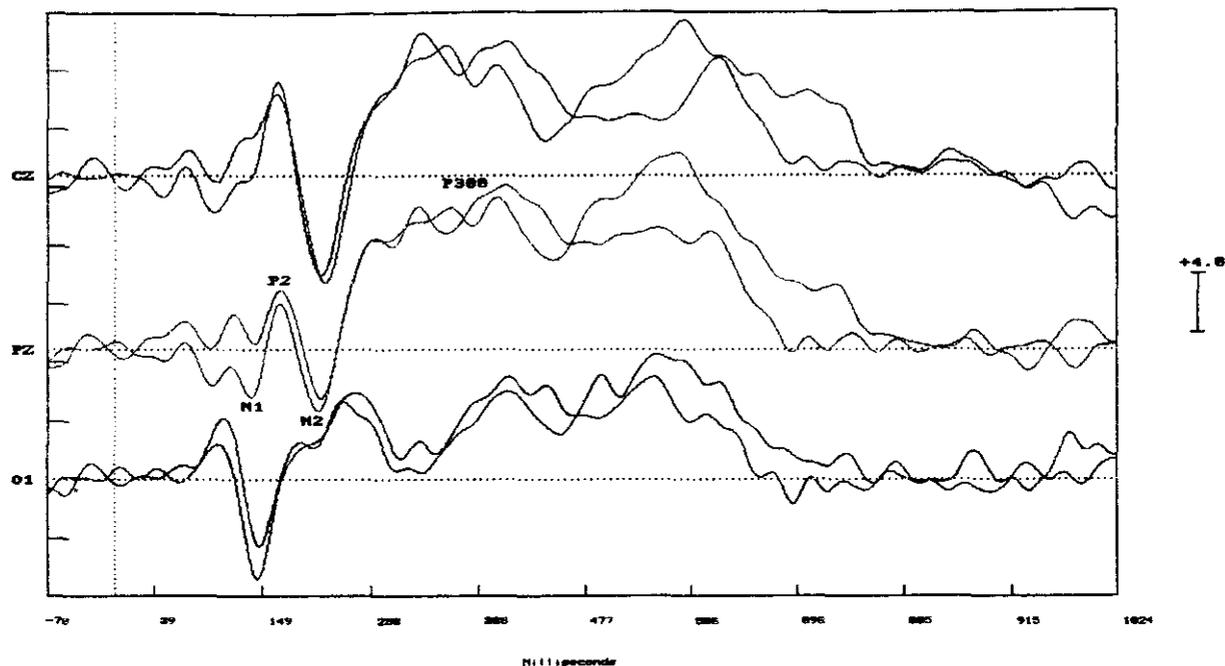


Figura VII.5.3.3. Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

y amplitud, por ejemplo, el componente P300 se genera en forma más temprana y con una menor amplitud. También, existe un incremento en la diferencia de amplitudes P2-N2, sugiriendo que la dificultad del experimento afecta tanto a los componentes exógenos como a los componentes endógenos. Las réplicas del potencial evocado visual se presentan en la figura VII.5.3.3 y confirman la reproducibilidad de los componentes antes citados.

La distribución espacial de la actividad eléctrica auditiva se muestra en la figura VII.5.3.4. El comportamiento del potencial evocado auditivo es similar al obtenido en el tercer experimento. Los detalles de la actividad eléctrica auditiva, para el estímulo target de 1100 Hz, se presentan en la figura VII.5.3.5. El componente N100 presenta un decremento en amplitud mientras que el componente P200 es similar al obtenido en el tercer experimento. El componente N200 se genera más temprano mientras que el componente P300 muestra un incremento en su amplitud en comparación con el

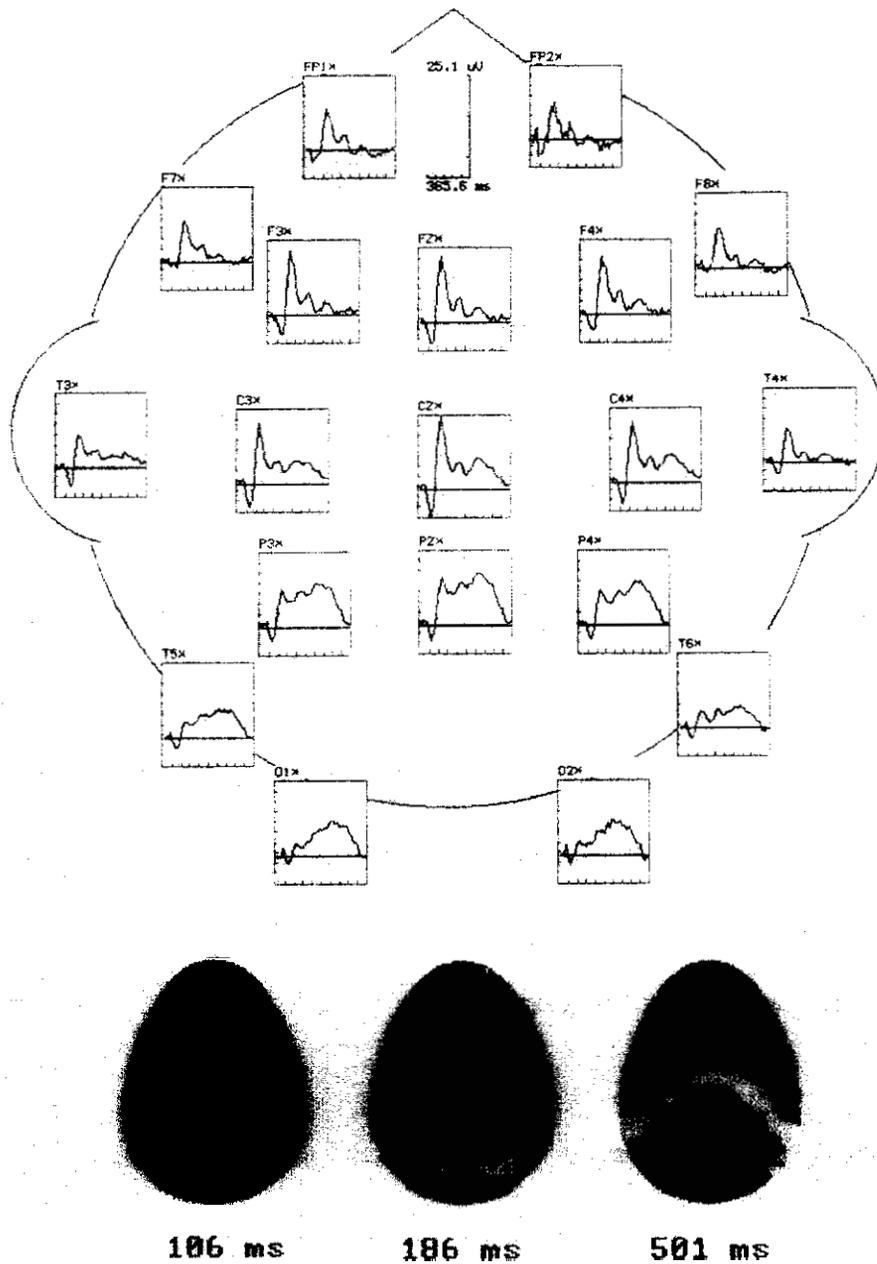


Figura VII.5.3.4. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

componente P300 del tercer experimento. Pareciera que el sujeto requiere más recursos neuronales para discernir el tono de 1100 Hz del tono de 1060Hz. Las réplicas del potencial evocado auditivo

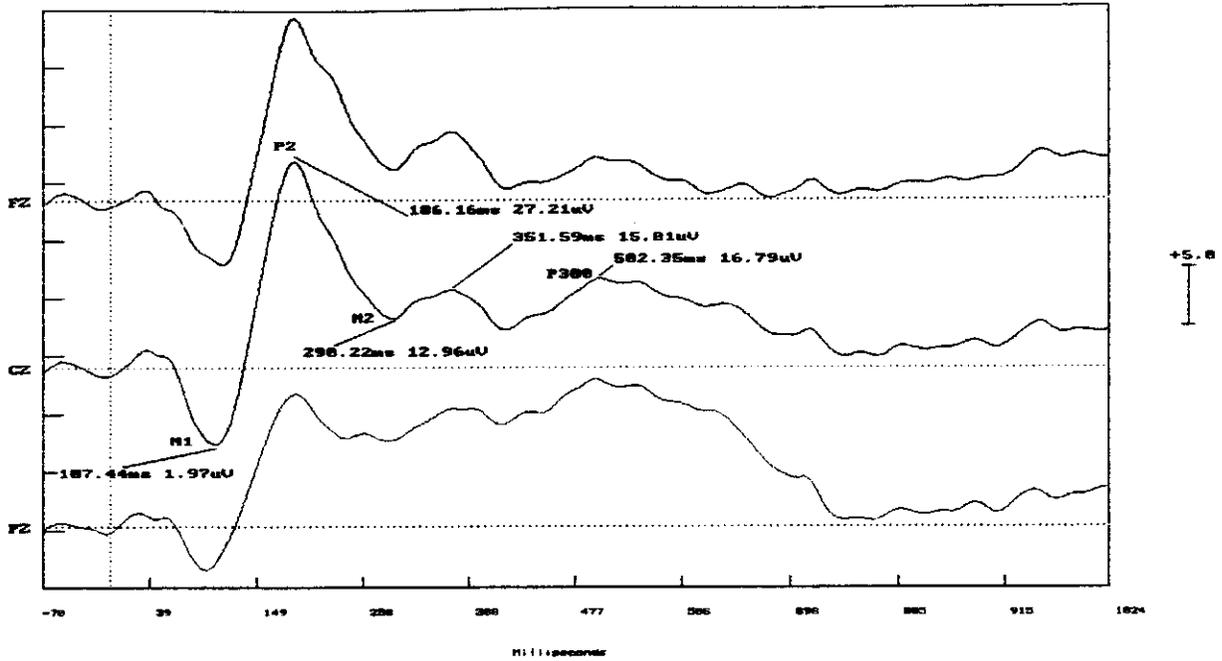


Figura VII.5.3.5. Potencial evocado auditivo por un tono de 1100 Hz en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Cz, indicando sus latencias.

se muestran en la figura VII.5.3.6 y confirman la reproducibilidad de cada uno de los componentes.

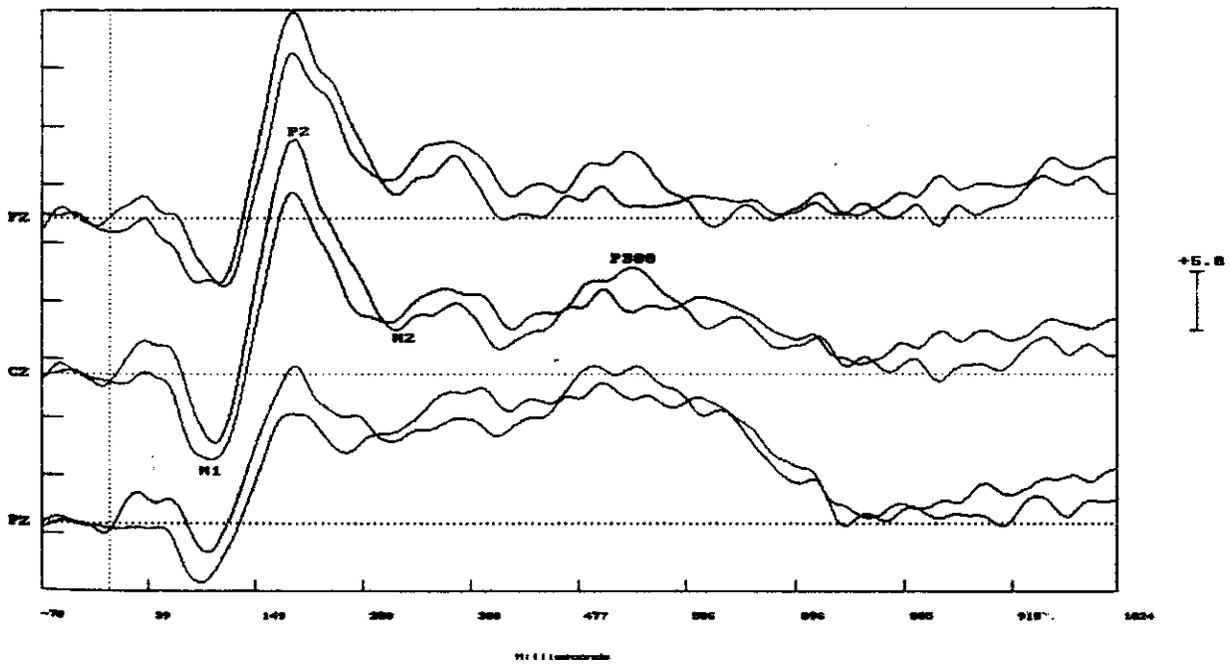


Figura VII.5.3.6. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediandolas épocas pares e impares.

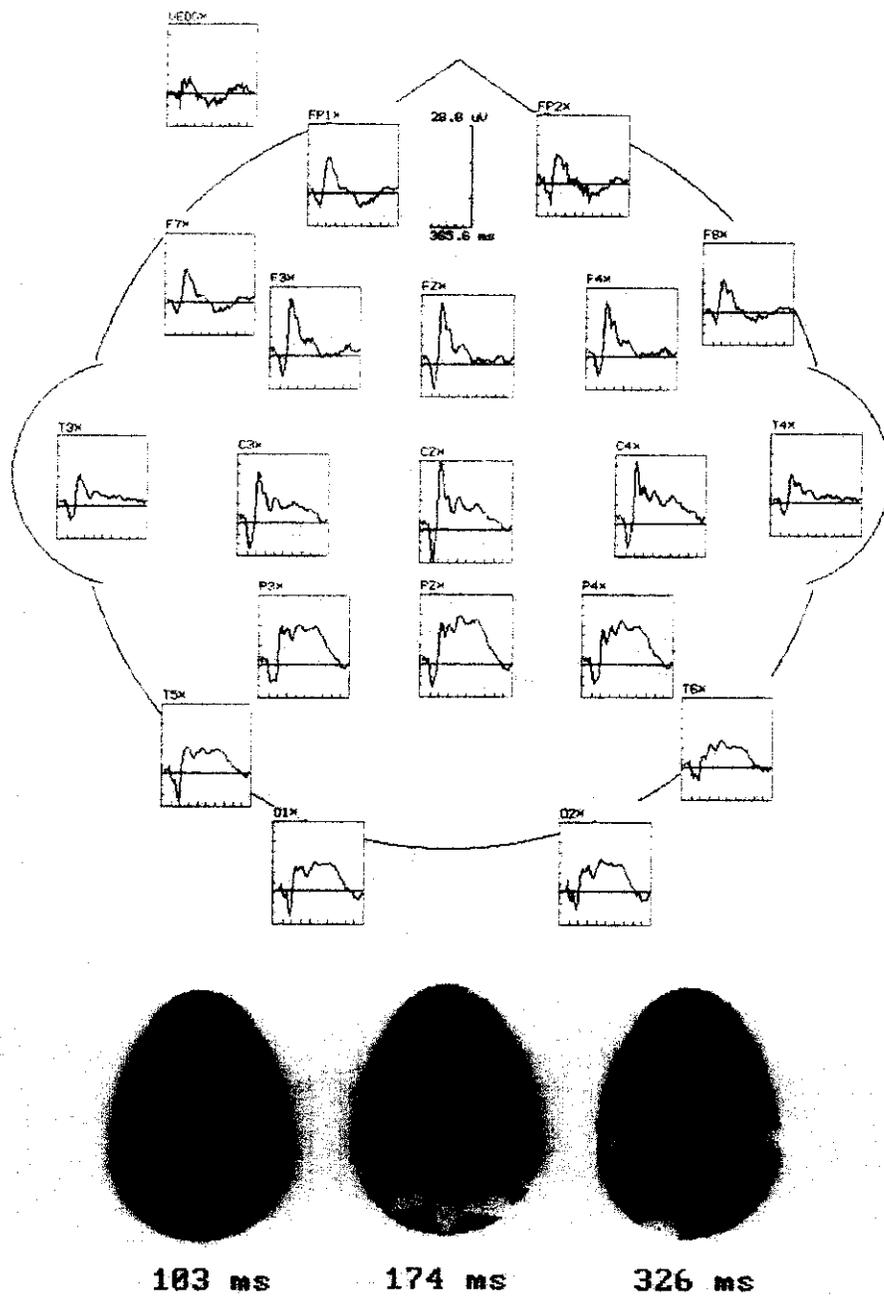


Figura VII.5.3.7. Distribución espacial del potencial evocado bimodal . Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

A pesar del incremento en la dificultad de reconocer los estímulos incluidos en el presente paradigma, la distribución espacial del potencial evocado bimodal es similar a la obtenida en el tercer

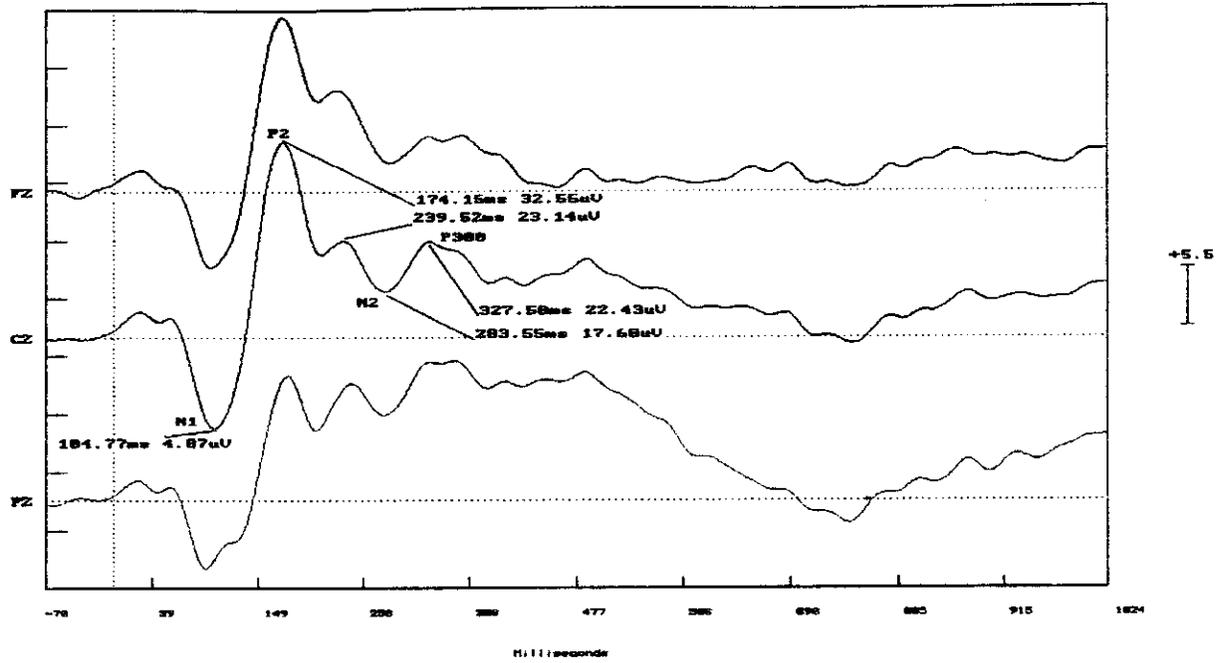


Figura VII.5.3.8. Potencial evocado bimodal generado por la presentación simultánea de un flash de color rojo y un tono de 1100 Hz.

experimento, figura VII.5.3.7. El potencial evocado bimodal, con cero milisegundos entre los inicios

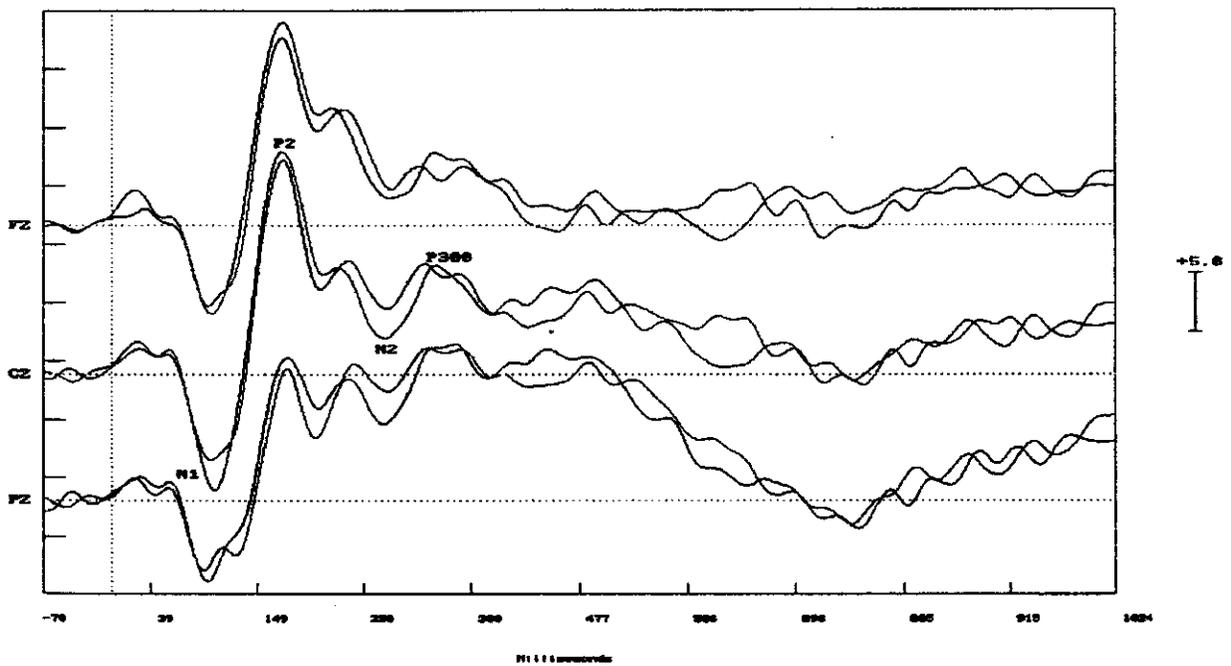


Figura VII.5.3.9. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

de los estímulos, morfológicamente es similar al potencial generado en el tercer experimento, figura VII.5.3.8. Pequeños cambios se generan en las latencias de los componentes mientras que los cambios de amplitud son más notorios en el componente bimodal exógeno N100 y los componentes endógenos. Las réplicas del potencial evocado bimodal se muestran en la figura VII.5.3.9 y confirman la autenticidad de los componentes.

Las actividades bimodales generadas por el presente experimento en las diferentes

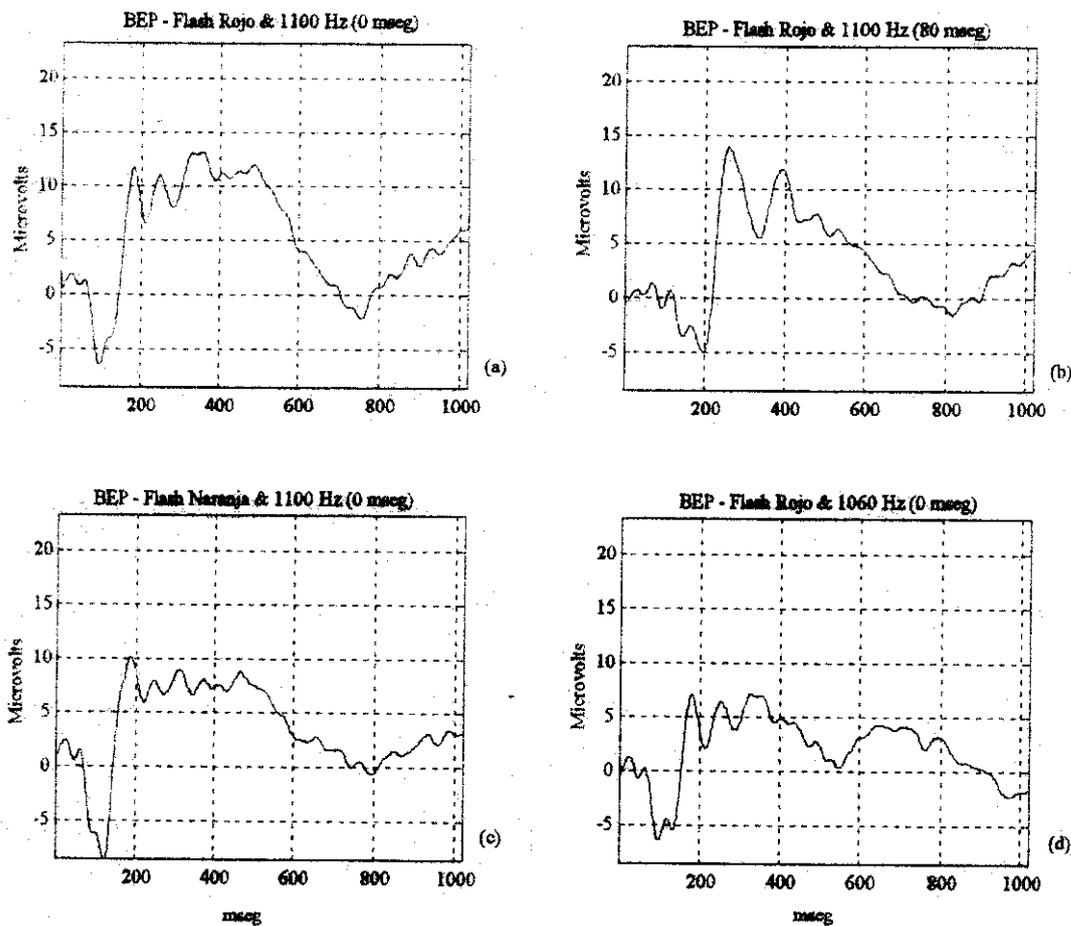


Figura VII.5.3.10. Potenciales evocados bimodales adquiridos. El sujeto presiona un botón en las condiciones experimentales (a) y (b) y evita generar una respuesta en las condiciones (c) y (d). Los potenciales evocados corresponden al electrodo Pz.

combinaciones de estimulación se incluyen en la figura VII.5.3.10. La morfología de los potenciales evocados bimodales, para el tercer y para el presente experimento, evocados por los estímulos "target" en las condiciones de cero y 80 milisegundos sugieren que se generan procesos exógenos y endógenos similares. El tono de 1060 Hz genera un potencial bimodal morfológicamente similar al generado por el tono de 1000 Hz del tercer experimento pero con un decremento en su amplitud. La actividad bimodal generada por el flash de color naranja en lugar del flash de color azul presenta una morfología diferente. La observación anterior podría tomarse como una prueba del efecto de

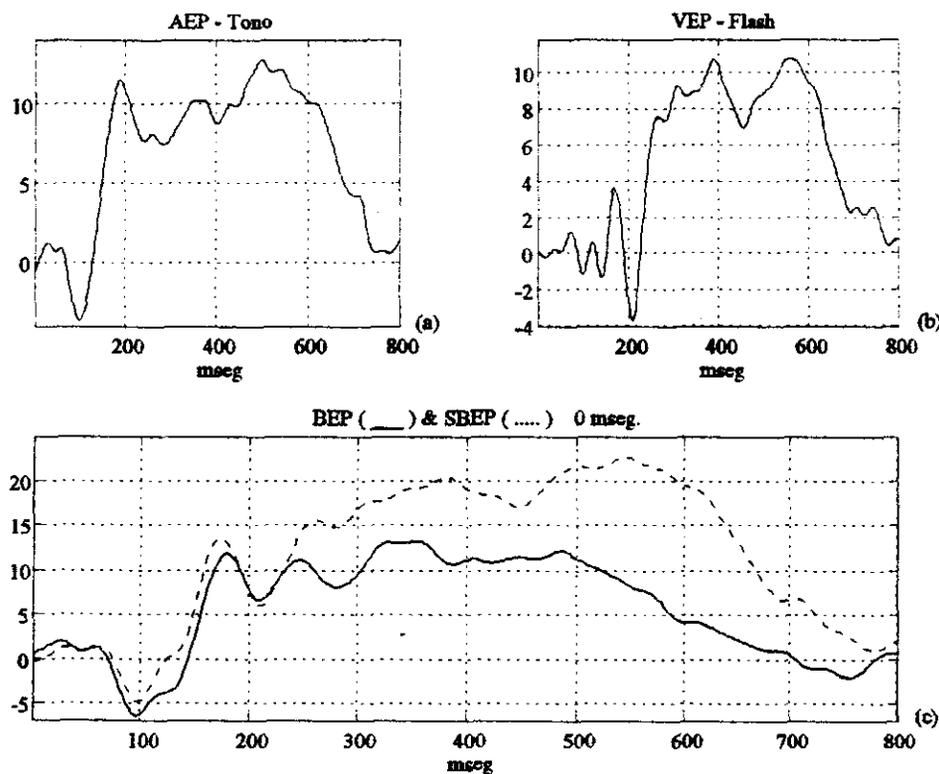


Figura VII.5.3.11. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) potencial evocado auditivo (AEP) generado por un tono de 1100 Hz, (b) potencial evocado visual (VEP) generado por un flash de color rojo, (c) potencial evocado bimodal (BEP) y potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP) con estimulación simultánea.

incrementar la dificultad de la tarea y de la reproducibilidad de los eventos de procesamiento de información.

En la figura VII.5.3.11 se comparan el potencial evocado sintetizado (SBEP) con el potencial evocado bimodal adquirido (BEP), para el electrodo Pz. Es importante observar que el SBEP predice una actividad importante y con una duración mayor que la que contiene el potencial evocado bimodal adquirido, cuya actividad se decremента después de los 400 milisegundos. Pareciera que el sujeto toma su decisión en menor tiempo en la condición bimodal que en la estimulación unimodal dado que el proceso de cierre bimodal termina antes que el proceso de cierre visual o auditivo. Lo anterior puede apoyarse por el tiempo de reacción más corto para estimulación bimodal en comparación con los tiempos de reacción unimodales, Tabla VII.5.1.

TABLA VII.5.1.
Valor promedio y desviación estándar de los tiempos de reacción unimodales y bimodales.

Tipo	Valor promedio	Desviación Estándar
Flash	0.564	0.088
Tono	0.613	0.072
Flash - 0 mseg - Tono	0.538	0.074
Flash - 80 mseg - Tono	0.516	0.102

VII.5.4. Conclusiones

Las actividades unimodales y bimodales adquiridas obtenidas al reducir la discriminabilidad de los estímulos muestran que la dificultad del paradigma se refleja por el comportamiento del

componente P300 así como por las latencias y cambios de amplitud de los componentes exógenos. El tiempo de reacción bimodal es menor que el tiempo de reacción en estimulación visual o auditiva unimodal. Los hallazgos anteriores indican posibles interacciones entre las trayectorias sensoriales visual y auditiva.

VII.6. Experimento # 5

El quinto experimento, con el propósito de proporcionar información adicional del fenómeno intersensorial, es dedicado a determinar los efectos de información redundante sobre el potencial evocado bimodal. La evaluación se realiza mediante una tarea de filtrado, en donde un aspecto importante es el relacionado con la separabilidad o integrabilidad de las dimensiones de las modalidades. Una prueba crítica de estas características se origina de procedimientos en los cuales la información proporcionada por las dos dimensiones es no redundante y la atención a las dos dimensiones puede interferir con el desempeño de la tarea. Si el sujeto no puede excluir la dimensión irrelevante, las dimensiones son "integrables", si no existe interferencia las dimensiones son "separables". En el presente experimento los procesos cognoscitivos se afectan por la baja probabilidad de ocurrencia del estímulo "target". Los puntos específicos a ser investigados son: a) diferencias morfológicas entre el potencial evocado auditivo y el potencial evocado bimodal y b) posibles relaciones intersensoriales.

VII.6.1. Objetivo

Estudio del fenómeno intersensorial en un paradigma de filtrado en el que se considera una baja probabilidad de ocurrencia del estímulo target. El experimento es dedicado no únicamente al estudio de las ondas cognoscitivas generadas por el proceso de decisión, como en los experimentos anteriores, además se incluyen aspectos como expectancia debido a la frecuencia a la que se presentan los estímulos.

VII.6.2. Método

Estímulos

- Estímulos Unimodales: Tono y flash. El tono se presenta en forma binaural a través de audífonos insertables mientras que el flash se presenta como un círculo de color al centro de la pantalla de un monitor de computador de 17 pulgadas. Existen cuatro condiciones de estimulación unimodal: el estímulo auditivo menos frecuente consiste de un tono de 1100 Hz mientras que el estímulo auditivo frecuente corresponde a un tono de 1000 Hz. El estímulo visual menos frecuente es representado por un flash de color azul mientras que el estímulo visual frecuente corresponde a un flash de color rojo.
- Estímulos Bimodales: Las diferentes combinaciones de estimulación bimodal se forman como sigue: flash de color rojo & tono de 1000 Hz (frecuente/frecuente), flash de color azul & tono de 1000 Hz (infrecuente/frecuente), flash de color rojo & tono de 1100 Hz (frecuente/infrecuente) y flash de color azul & tono de 1100 Hz (infrecuente/infrecuente).
- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con diferente probabilidad de ocurrencia. La probabilidad de ocurrencia del estímulo infrecuente se establece en 0.005 mientras que la probabilidad de ocurrencia del estímulo frecuente se establece en 0.25.
- Intervalo entre Estímulos: de 2 a 3 segundos, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Tono: Tono de 1000 y 1100 Hz con 60 milisegundos de duración, tiempo de subida y de bajada de 10 milisegundos e intensidad de 80 dB.

- Flash: Flash de color rojo y azul con 60 milisegundos de duración presentados al centro de un monitor de computadora utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- Número de épocas: 2000 épocas con 100 presentaciones del estímulo infrecuente.
- Frecuencia de muestreo: 500 Hz
- Número de muestras: 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- Duración de cada época: 1094 milisegundos
- Número de canales: 20
- Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.
- Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.

Tarea

El sujeto necesita oprimir un botón cuando el estímulo auditivo infrecuente correspondiente al tono de 1100 Hz es presentado sólo o en forma simultánea con un estímulo visual, y evitar generar respuesta en cualquier otra condición. Al sujeto se le solicita fijar la vista en la pequeña cruz que se presenta, entre estimulación visual, a la mitad de la pantalla.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo.

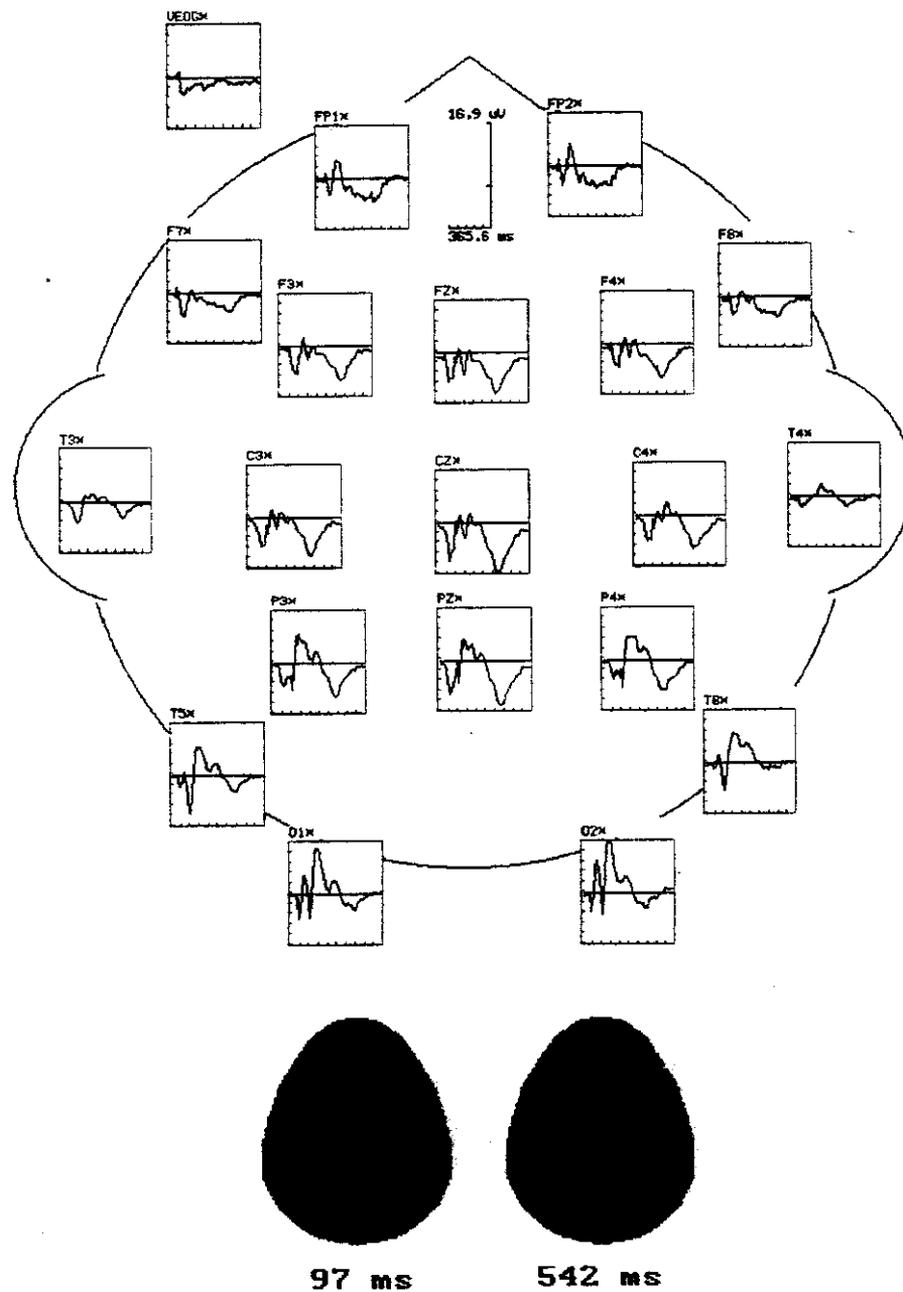


Figura VII.6.3.1. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100 y N400.

Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto; sus localizaciones estan de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijandose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que estan contaminadas con movimiento ocular.

VII.6.3. Potenciales Evocados Adquiridos

La distribución espacial de la actividad visual correspondiente al flash de color azul se muestra en la figura VII.6.3.1, como puede observarse la actividad del componente N100 es localizada en la

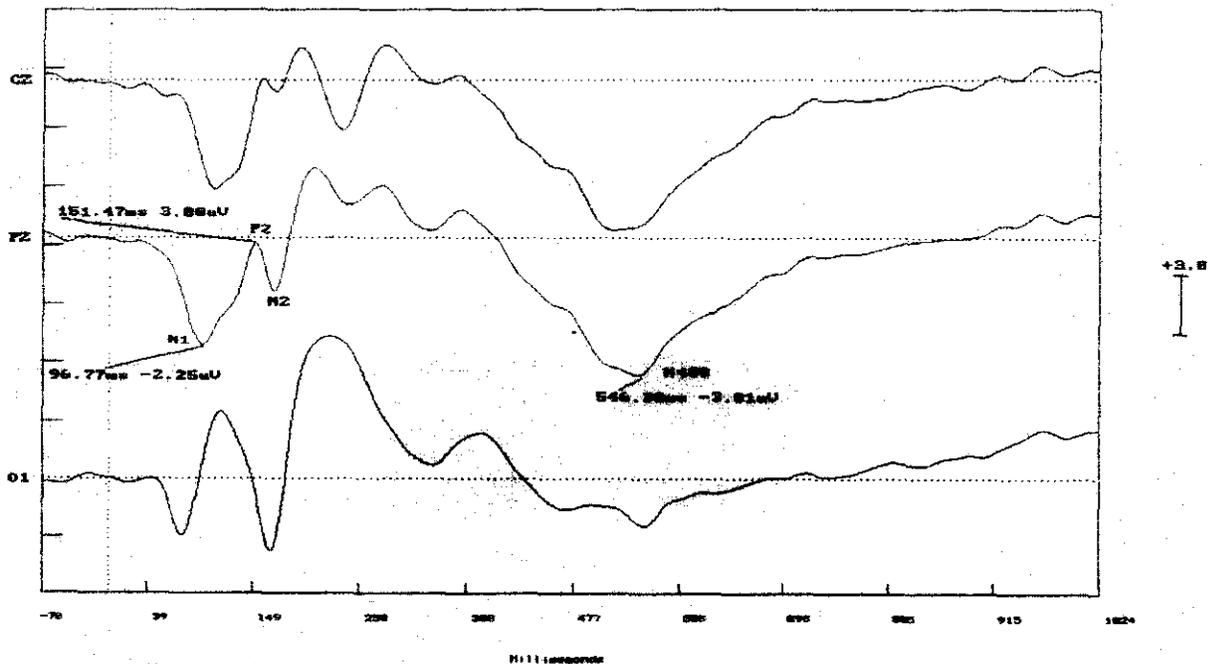


Figura VII.6.3.2. Potencial evocado visual por un flash de color azul en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Pz.

región parietal mientras que el componente N400 presenta una distribución vertex-parietal. En la figura VII.6.3.2 puede apreciarse que el componente N100 se genera a los 96 milisegundos, el componente P200 a los 151 milisegundos y el componente N200 a los 171 milisegundos. En contraste con los procesos cognoscitivos generados en los experimentos anteriores, en el presente experimento el proceso cognoscitivo esta representado por una actividad negativa que tiene su mayor amplitud

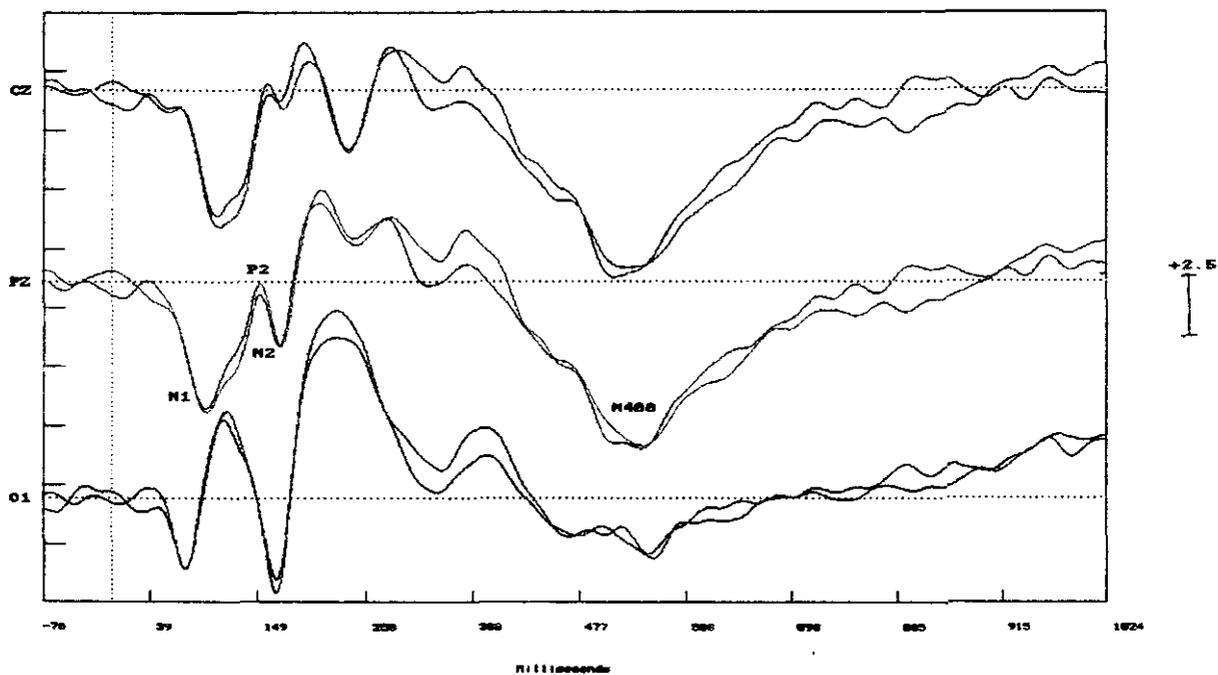


Figura VII.6.3.3. Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

alrededor de los 546 milisegundos. Actividad negativa se ha encontrado en experimentos semánticos y se ha relacionado con la presencia de palabras sin sentido en una oración, esta actividad negativa es etiquetada en la figura VII.6.3.2 como N400. La evaluación de un estímulo equivocado en el proceso de decisión del sujeto puede ser relacionado con la presencia del componente N400, sugiriendo que el componente N400 no esta limitado a procesos semánticos. Las réplicas del potencial evocado visual, correspondiente al flash de color azul, se muestran en la figura VII.6.3.3

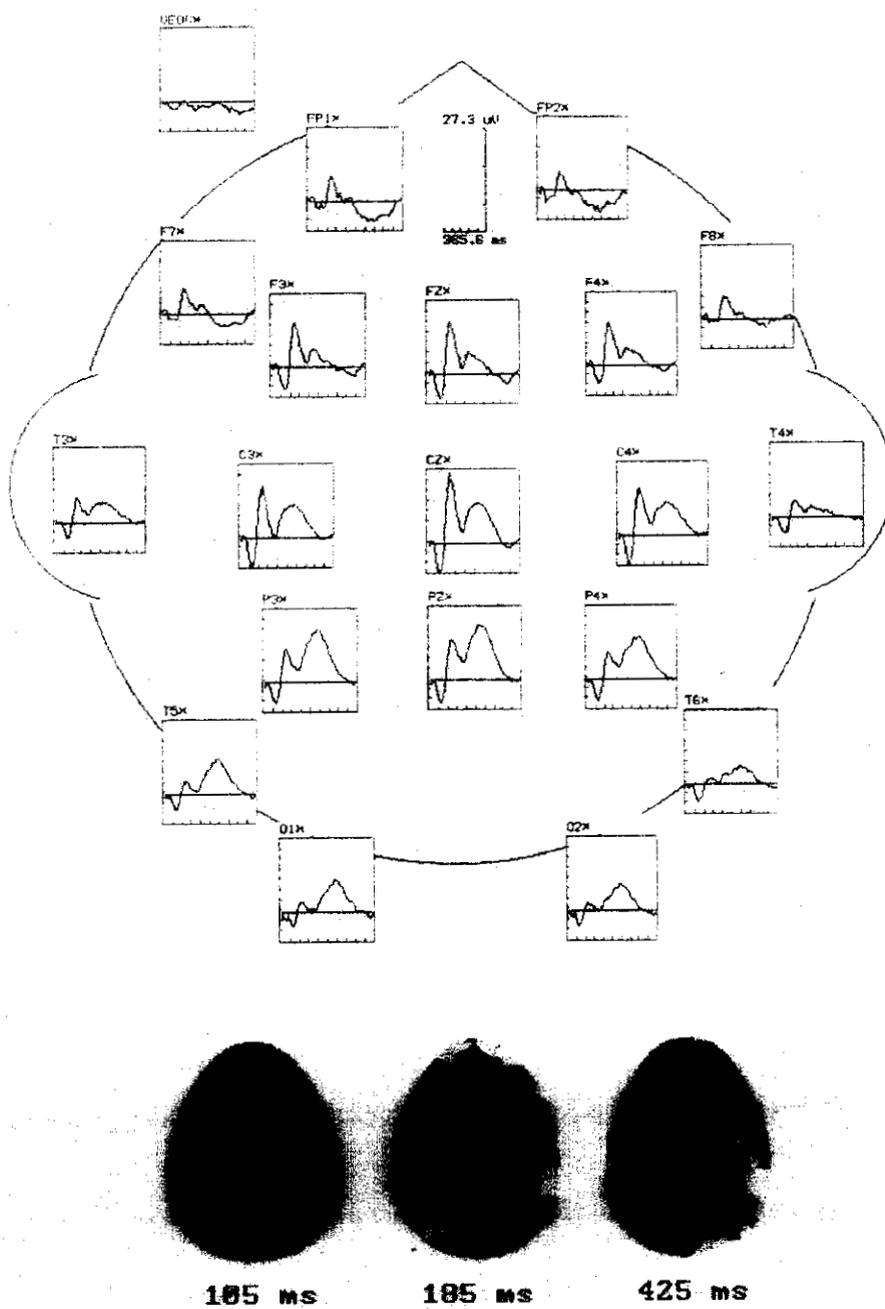


Figura VII.6.3.4. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

y confirman la reproducibilidad de cada uno de los componentes.

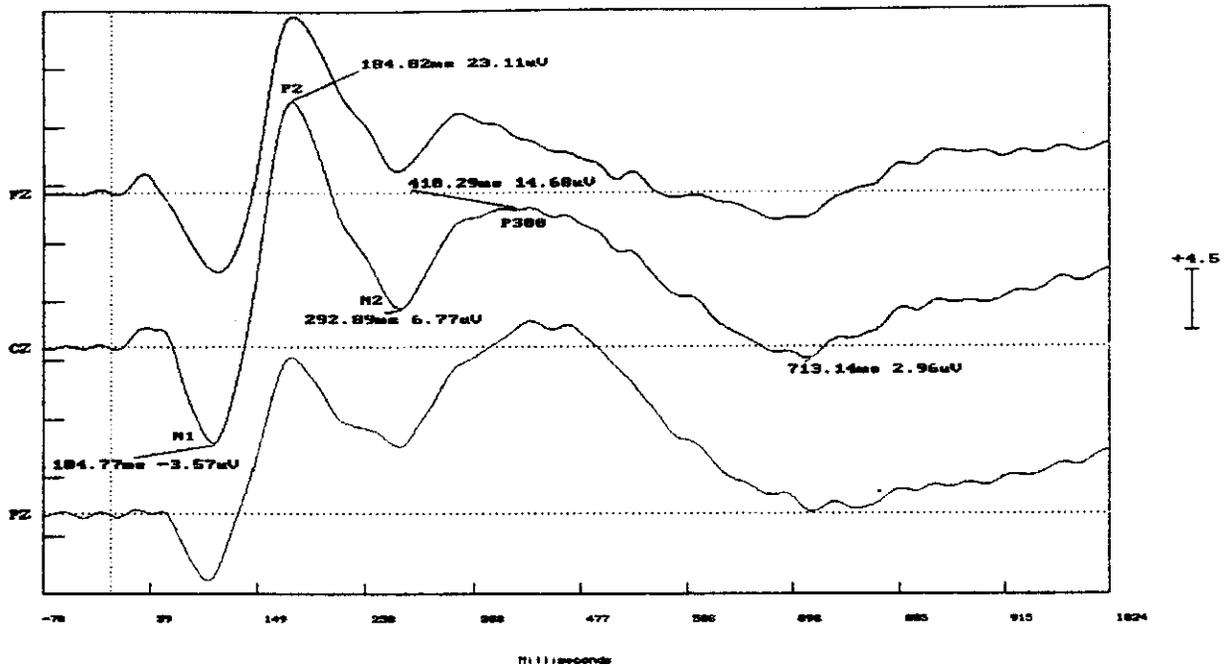


Figura VII.6.3.5. Potencial evocado auditivo por un tono de 1100 Hz en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Cz, indicando sus latencias.

La distribución espacial del potencial evocado por el estímulo auditivo infrecuente se muestra en la figura VII.6.3.4, indicando un prominente componente P300. En la figura VII.6.3.5. se observa que el componente N1 se presenta alrededor de los 104 milisegundos, P2 se genera a los 184

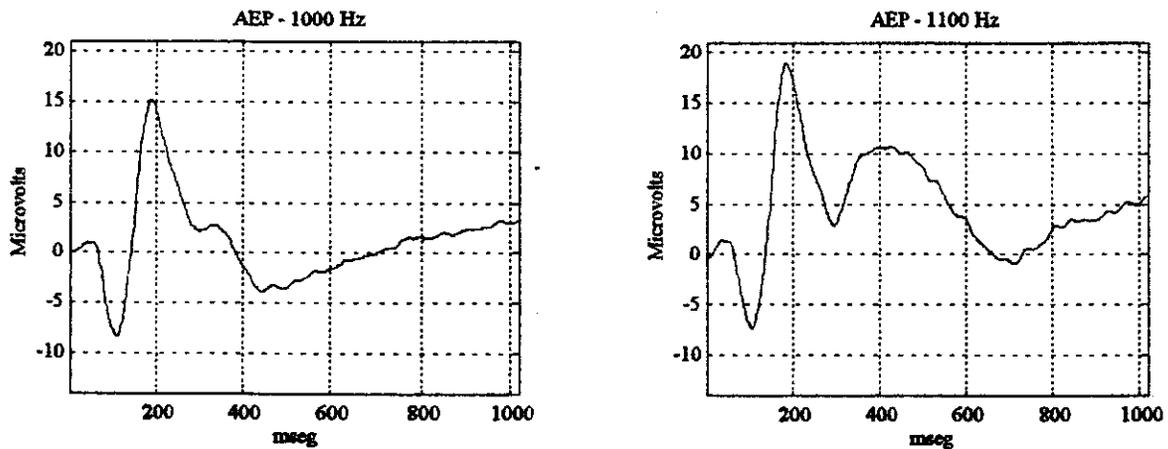


Figura VII.6.3.6. Potenciales evocados auditivos. (a) Potencial evocado por un tono frecuente de 1000 Hz y (b) potencial evocado por un tono infrecuente de 1100 Hz.

milisegundos, N2 se genera a los 292 milisegundos y el componente P300 presenta su máxima amplitud alrededor de los 410 milisegundos. Los componentes N1 y P2 presentan latencias similares a los componentes del tercer experimento. Sin embargo, la latencia del componente N2 presenta un pequeño corrimiento temporal mientras que las ondas del componente P300 se combinan en un onda. Como se esperaba, la baja probabilidad del estímulo auditivo genera un componente P300 de mayor amplitud en comparación con el componente P300 del tercer experimento. La diferencia en la amplitud del componente cognoscitivo entre el potencial evocado por un tono de 1100 Hz y por un tono de 1000 Hz se muestra en la figura VII.6.3.6. El efecto de incluir un estímulo "target" con baja probabilidad de ocurrencia se observa en la amplitud del componente P300 y posiblemente con alguna interacción entre los procesos exógenos y endógenos relacionados con la categorización de los estímulos. Las réplicas del potencial evocado auditivo se presentan en la figura VII.6.3.7, confirmando la existencia de los diferentes componentes arriba citados.

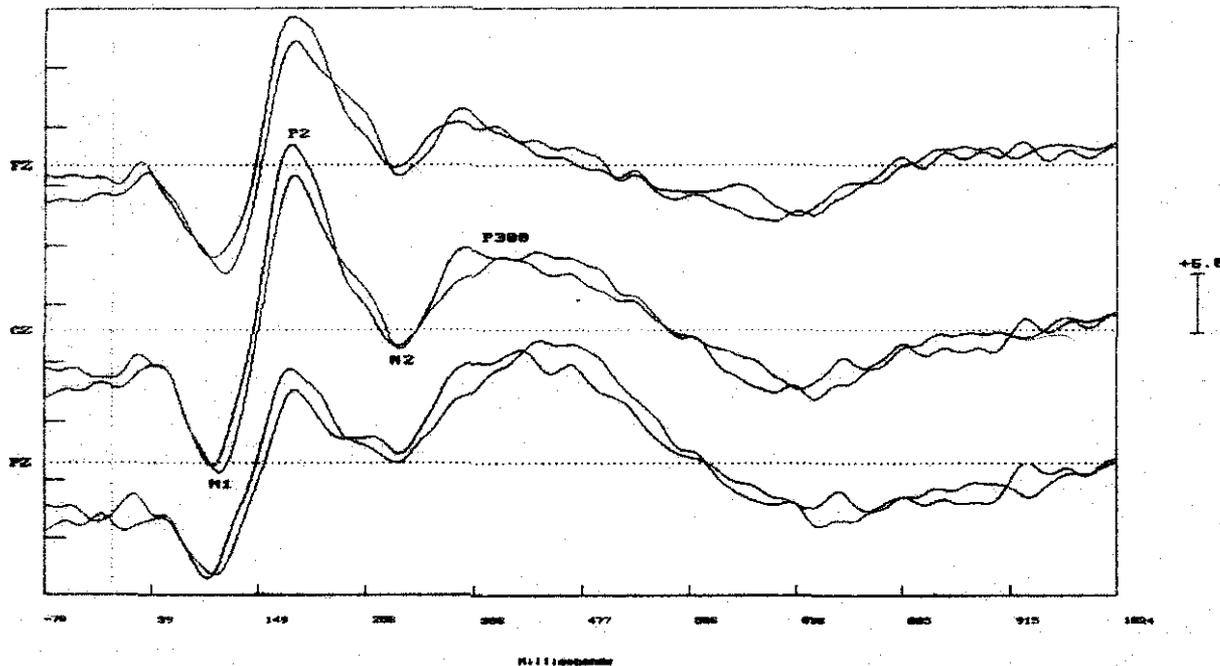


Figura VII.6.3.7. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediando las épocas pares e impares.

La distribución espacial de la actividad bimodal, incluyendo las formas de onda y mapas topográficos, se muestra en la figura VII.6.3.8. La distribución espacial es similar a la distribución

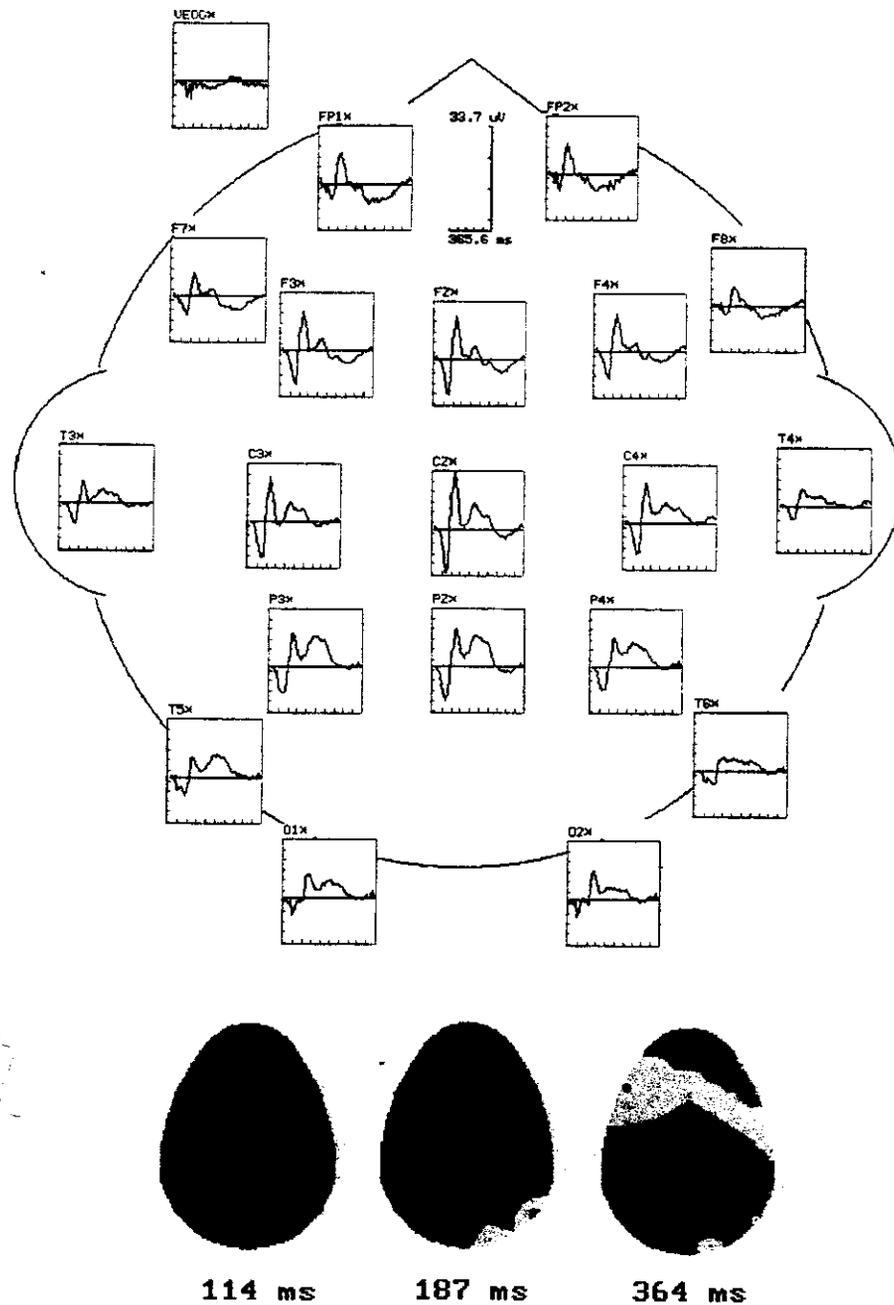


Figura VII.6.3.8. Distribución espacial del potencial evocado bimodal . Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

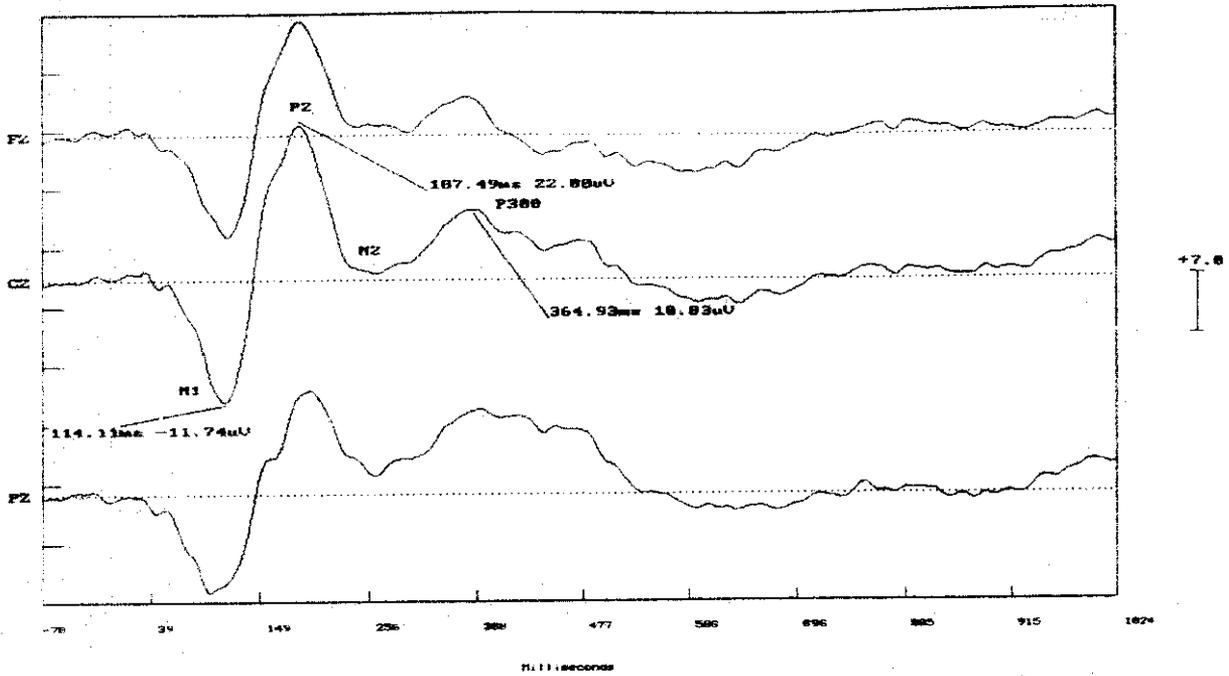


Figura VII.6.3.9. Potencial evocado bimodal generado por la presentación simultánea de un flash de color azul y un tono de 1100 Hz.

espacial del potencial evocado auditivo y es evidente que es diferente de la distribución espacial de

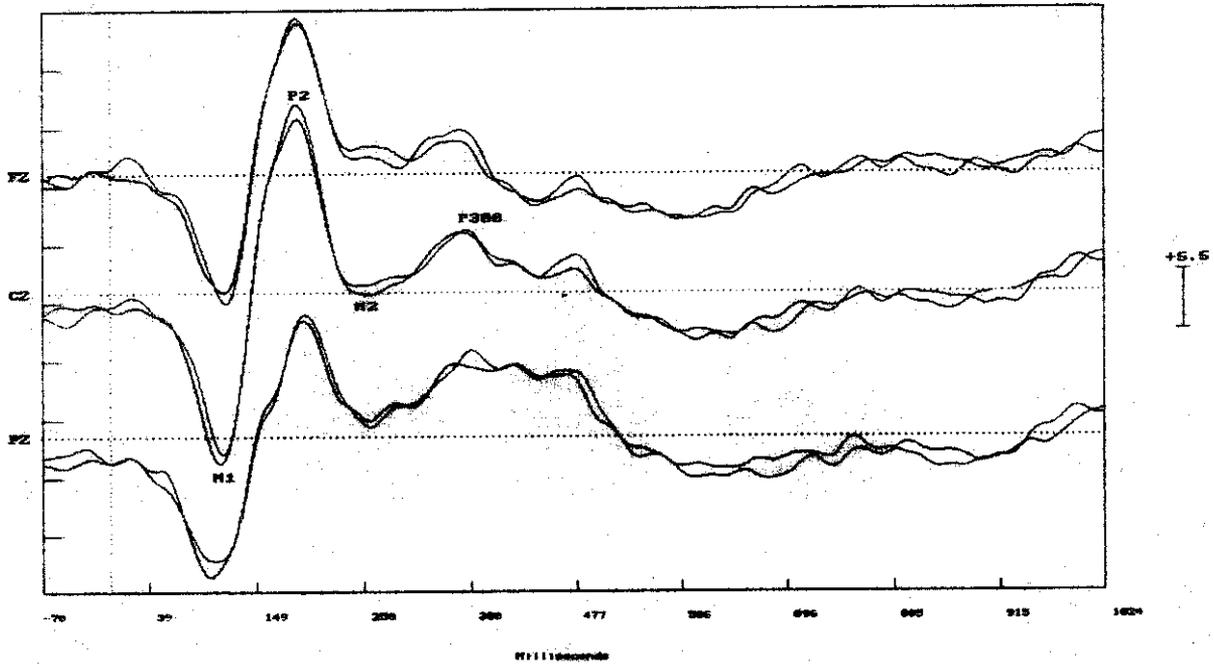


Figura VII.6.3.10. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

la actividad visual. El potencial bimodal evocado por la combinación de los estímulos auditivo y visual con una baja probabilidad de ocurrencia, figura VII.6.3.9, presenta el componente N100 alrededor de los 114 milisegundos, el componente P200 alrededor de los 187 milisegundos, el componente N200 alrededor de los 265 milisegundos y el componente cognoscitivo P300 alrededor de los 364 milisegundos. Es importante observar que el componente N200 parece traslaparse con el componente P300, generando una morfología plana en lugar de un pico bien definido.

La tarea de filtrado asume que el sujeto puede evaluar información y evitar los efectos de eventos que se presentan en otras vías sensoriales. La hipótesis anterior implica que el potencial evocado bimodal podría parecerse al potencial evocado generado por el estímulo "target". En el presente experimento, la morfología del potencial evocado bimodal se "parece" a la morfología del potencial auditivo, sin embargo, son evidentes algunas diferencias, particularmente en los componentes N200 y P300. Las réplicas del potencial evocado bimodal se muestran en la figura VII.6.3.10 y confirman la reproducibilidad de los diferentes componentes arriba citados.

En la figura VII.6.3.11 se muestran las actividades bimodales generadas en el presente experimento. La actividad cognoscitiva mas intensa corresponde al estímulo en donde se presenta el tono infrecuente. Como puede observarse, los procesos cognoscitivos para las combinaciones flash azul-tono de 1000 Hz y flash rojo-tono de 1000 Hz son mas pequeños que los procesos cognoscitivos para el estímulo en donde se incluye el tono "target".

El potencial evocado bimodal sintetizado, en comparación con los potenciales bimodales

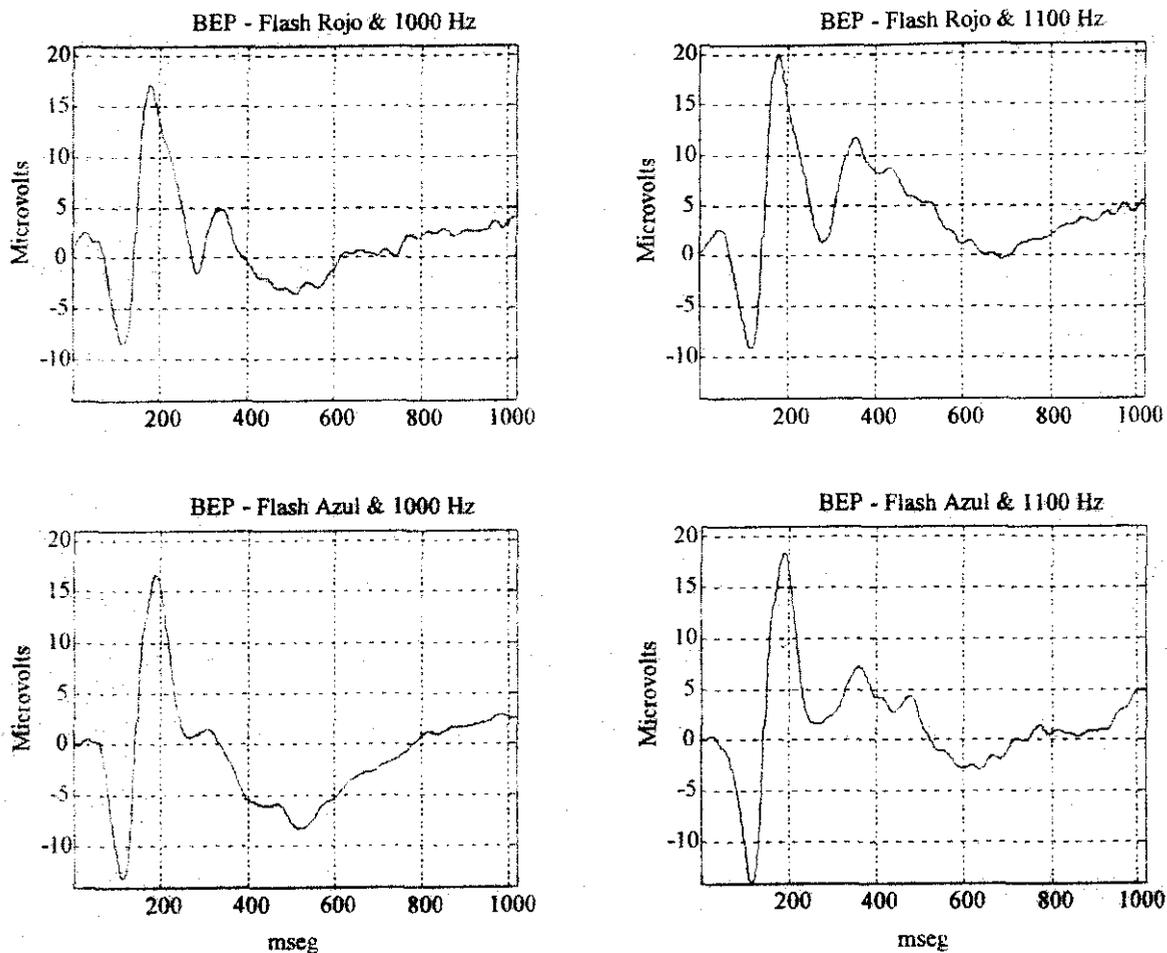


Figura VII.6.3.11. Potenciales evocados bimodales adquiridos en cuatro condiciones experimentales diferentes con estimulación auditiva-visual simultánea.

simetizados en los experimentos anteriores, se "parece" en mayor medida al potencial evocado bimodal adquirido, sin embargo, existen ciertas diferencias, figura VII.6.3.12. Es posible que la energía del estímulo no-relevante interfiera con el estímulo relevante y origine una decodificación más rápida del estímulo y por consiguiente se termine en forma más temprana el proceso de cierre. Lo anterior podría estar soportado por el hecho de un menor tiempo de reacción para la estimulación bimodal en comparación con el tiempo de reacción ante la presencia del estímulo auditivo, Tabla

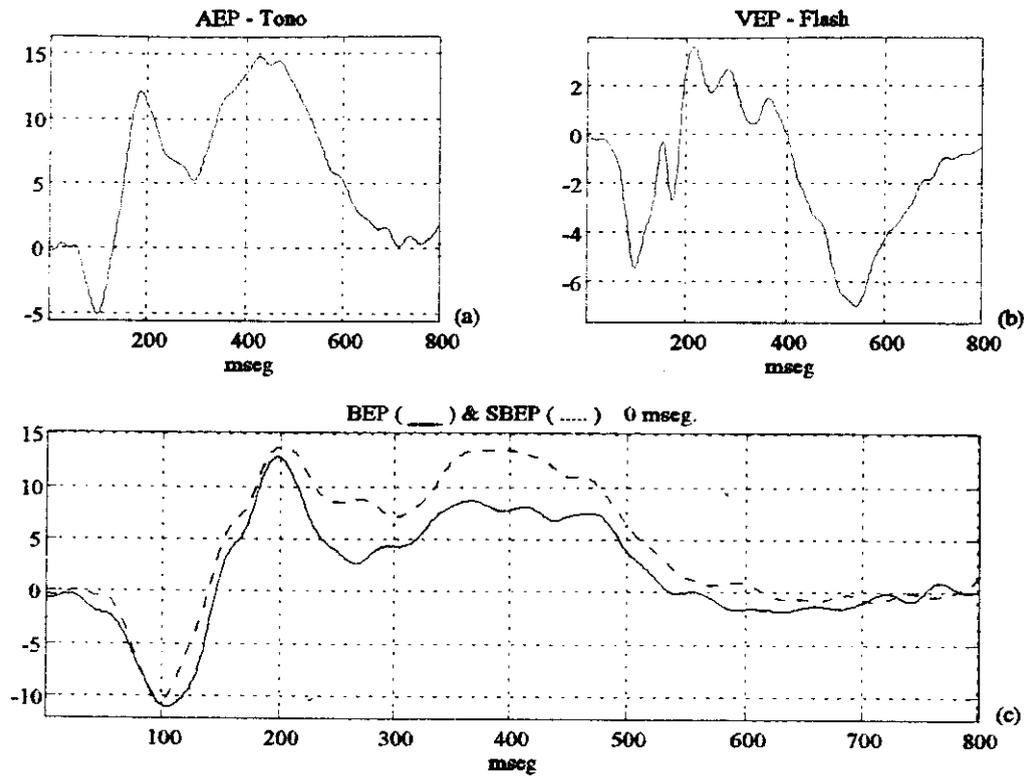


Figura VII.6.3.12. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) Potencial evocado auditivo (AEP) generado por un tono de 1100 Hz, (b) Potencial evocado visual (VEP) generado por un flash de color azul, (c) Potencial evocado bimodal (BEP) y potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP) con estimulación simultánea.

VII.6.1.

TABLA VII.6.1.
Valor promedio y desviación estándar de los tiempos de reacción unimodales y bimodales.

Tipo	Valor promedio	Desviación Estándar
Tono	0.450	0.075
Flash Rojo - Tono de 1100 Hz	0.424	0.072
Flash Azul - Tono de 1100 Hz	0.443	0.089

VII.6.5. Conclusiones

La tarea de filtrado esta relacionada con el grado de interferencia entre las trayectorias sensoriales relevantes y no-relevantes. En otras palabras, una tarea de filtrado se realiza cuando el potencial bimodal adquirido corresponde a la suma de la energía de las trayectorias relevantes y no-relevantes. En el presente experimento, la morfología del potencial evocado bimodal difiere de la obtenida en el tercer y cuarto experimento y se "parece" a la señal sintetizada por la suma de los potenciales evocados unimodales. Sin embargo, es necesario realizar más investigación para explicar la diferencia entre ambas señales, incluyendo el papel que juega el componente N400.

VII.7. Experimento # 6

En los experimentos anteriores se asignó al sujeto la tarea de detectar la presencia de un estímulo "target" en una vía sensorial o la presencia simultánea de estimulación en las vías sensoriales visual y auditiva. Al sujeto se le solicitó presionar un botón cuando se presenta una combinación de estímulos ortogonales. En el segundo y quinto experimento, el sujeto responde a un estímulo presentado en una vía sensorial mientras que en el tercer y cuarto experimento la tarea del sujeto consistió en detectar una combinación específica de estímulos ortogonales, es decir, flash de un cierto color y tono de una frecuencia específica. En los experimentos, la discriminabilidad de los estímulos se incorporó como parte del diseño del paradigma. En el presente experimento, la idea es analizar el fenómeno intersensorial utilizando estímulos que presenten una relación cognoscitiva "natural". En lugar de utilizar tonos y flashes, en el presente experimento se utilizan palabras y dibujos para generar los estímulos unimodales y bimodales. Los puntos específicos a investigar son: a) diferencias morfológicas entre los componentes unimodales y bimodales, y b) posibles interacciones sensoriales.

VII.7.1. Objetivo

El objetivo del experimento es analizar la relación entre los potenciales evocados unimodales y bimodal cuando palabras y dibujos tienen el mismo significado cognoscitivo.

III. Método

Estímulos

- Estímulos Unimodales: Palabras y dibujos. La palabra se presenta en forma binaural a través de audífonos insertables mientras que el dibujo se presenta en el centro de la pantalla de un

monitor de computador de 17 pulgadas. Existen cuatro condiciones de estimulación unimodal: el estímulo auditivo consiste de las palabras "bird" y "bear" mientras que el estímulo visual consiste de los dibujos de un pájaro y un oso.

- Estímulos Bimodales: Las diferentes combinaciones de estimulación bimodal se forman como sigue: dibujo de un pájaro & palabra "bird", dibujo de un oso & palabra "pájaro", dibujo de un pájaro & palabra "bear" y dibujo de un pájaro - Δt - palabra "bird", en donde $\Delta t = 80$ milisegundos.
- Presentación de los Estímulos: Cinco sesiones con los estímulos unimodales y bimodales presentados en forma aleatoria con igual probabilidad de ocurrencia.
- Intervalo entre Estímulos: de 2 a 3 segundos con una distribución de probabilidad uniforme.

Características de los Estímulos

- Palabras: Palabras "bird" y "bear" con 150 milisegundos de duración e intensidad de 80 dB.
- Dibujos: dibujos de un pájaro y un oso con 150 milisegundos de duración presentados al centro de un monitor de computadora utilizando un fondo de color negro.

Parámetros de Adquisición

- Número de épocas: 800 épocas con 100 presentaciones de cada uno de los estímulos.
- Frecuencia de muestreo: 500 Hz
- Número de muestras: 547 muestras incluyendo 35 muestras antes del inicio de la estimulación.
- Duración de cada época: 1094 milisegundos

- Número de canales: 20
- Las señales de EEG y EOG se adquieren 70 milisegundos antes del inicio de la estimulación con el propósito de generar una línea de base.
- Para la adquisición se utiliza un equipo marca NeuroScan con un filtro pasa-banda de 0.01-100 Hz.

Tarea

La tarea del sujeto consiste en presionar un botón, tan rápido como sea posible, en la condición unimodal cada vez que la palabra 'bird' o el dibujo de un pájaro se presentan, y en la condición bimodal cuando la palabra 'bird' y el dibujo de un pájaro se presentan simultáneamente o con 80 milisegundos de retraso. Al sujeto se le solicita fijar la vista en la pequeña cruz que se presenta, entre estimulación visual, a la mitad de la pantalla.

Procedimiento de Adquisición

El sujeto es colocado en una silla comfortable en una cámara a prueba de ruido y con la luz apagada. Al sujeto se le solicita no mover los párpados o los ojos mientras se presenta el estímulo. Por medio de una gorra elástica se fijan los electrodos a la cabeza del sujeto; sus localizaciones estan de acuerdo al sistema 10-20. Las posiciones utilizadas incluyen las posiciones frontales Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, la línea central C3, Cz, C4, la línea parietal P3, Pz, P4, la línea temporal T3, T4, T5, T6, y la línea occipital O1, O2. Para registrar el parpadeo se colocan electrodos por arriba y por abajo del ojo derecho. La referencia de todos los electrodos es la unión de las mastoides, fijandose el electrodo de tierra en la mitad de la frente. Las señales se promedian en forma selectiva para las

diferentes combinaciones de estímulos excluyendo aquellas épocas que están contaminadas con movimiento ocular.

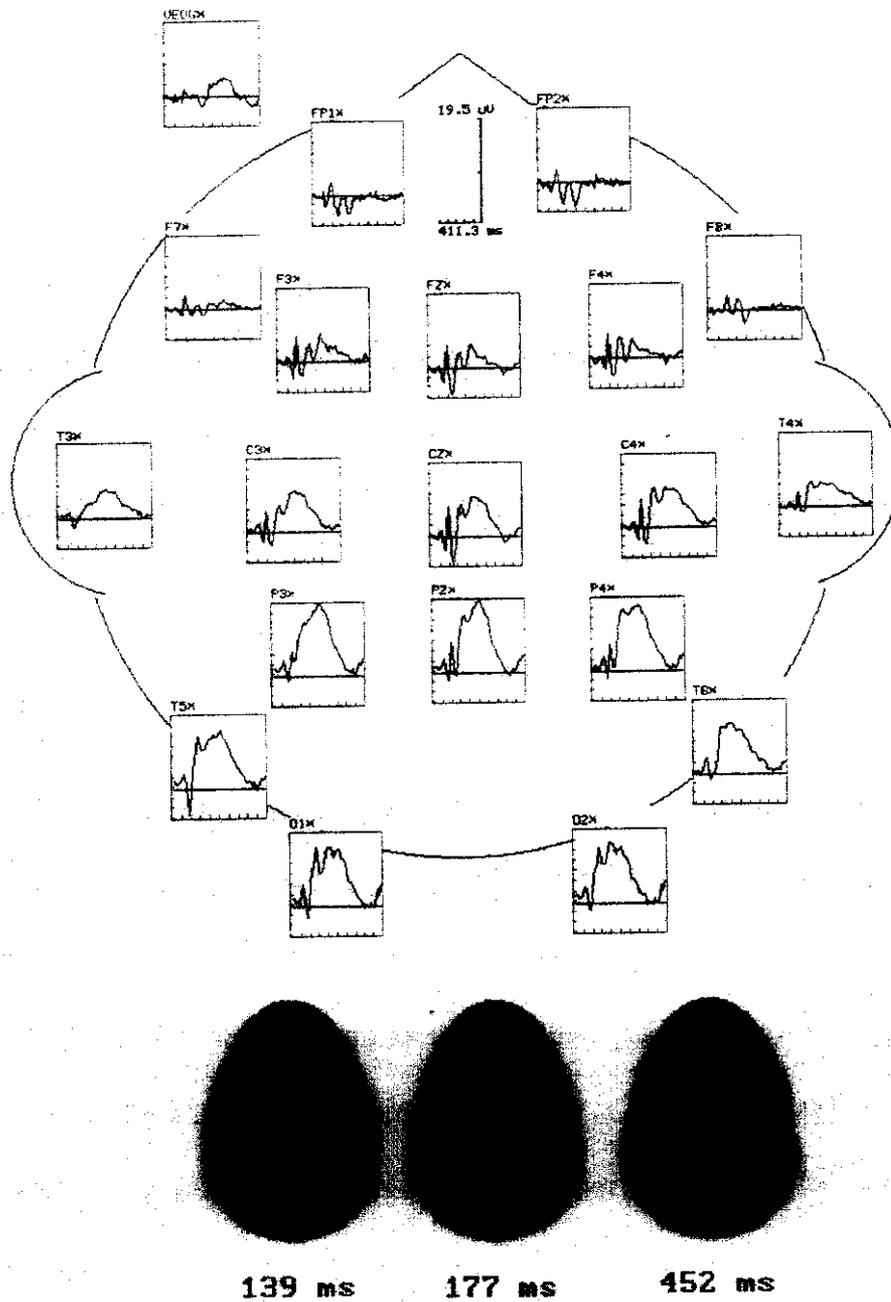


Figura VII.7.3.1. Distribución espacial del potencial evocado visual. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

VII.7.3. Potenciales Evocados Adquiridos

La distribución espacial del potencial evocado por el dibujo de un pájaro se presenta en la figura VII.7.3.1. Como puede observarse existe un componente N100 con una distribución fronto-central, un componente P200 distribuido centro-parietalmente y un componente P300 con distribución parietal-occipital. Los detalles de latencia y morfología de los componentes citados se muestran en la figura VII.7.3.2. El componente N100 se presenta alrededor de los 140 milisegundos, el componente P200 a los 176 milisegundos, el componente N200 se presenta a los 215 milisegundos y el componente P300 alrededor de los 451 milisegundos. Las latencias de los componentes endógenos y exógenos se retrasan en comparación con las latencias obtenidas en el tercer experimento, figura VII.7.3.3.(a). El hecho anterior puede relacionarse con un proceso de decodificación y de cierre más complejo de los estímulos así como la influencia de la duración del

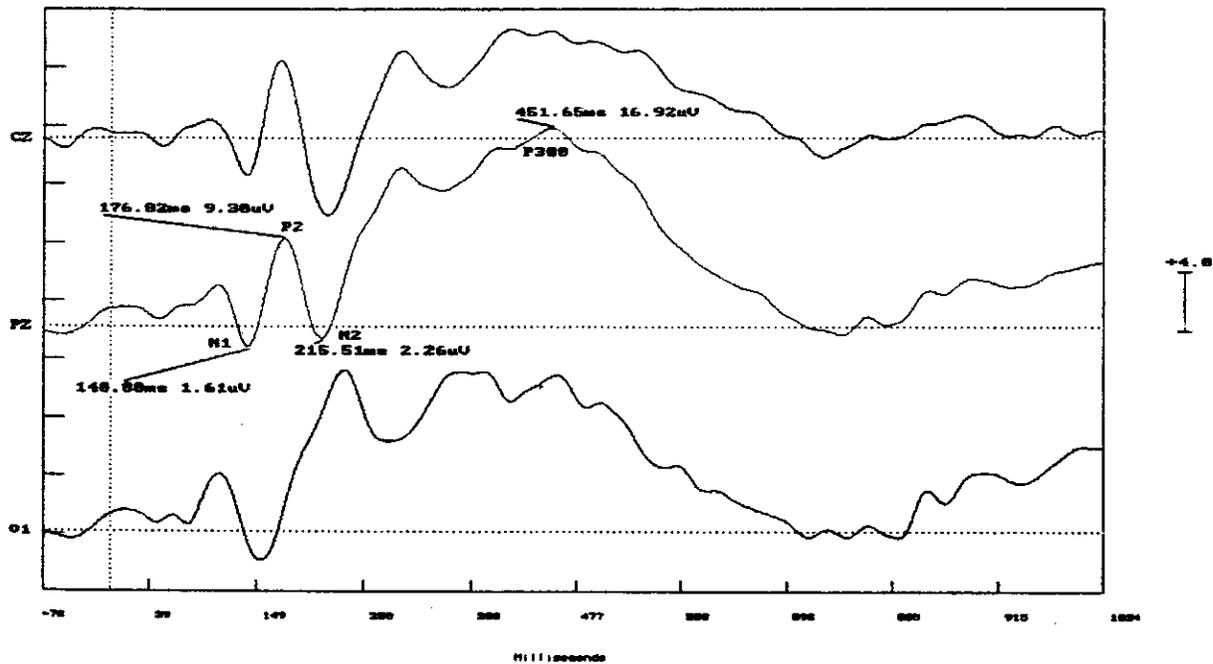


Figura VII.7.3.2. Potencial evocado visual generado por el dibujo de un pájaro en los electrodos Cz, Pz y O1. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Pz.

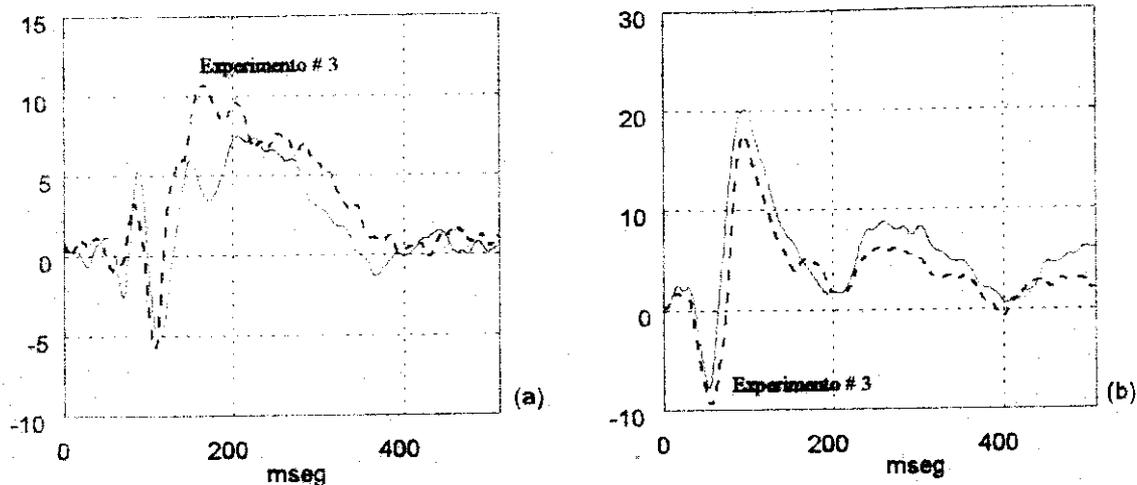


Figura VII.7.3.3. Potenciales evocados visuales correspondientes al tercer y sexto experimento. (a) Actividad visual generada por un flash (tercer experimento) y el dibujo de un pájaro y (b) actividad eléctrica auditiva generada por un tono de 1100 Hz (tercer experimento) y la palabra "bird".

estímulo, es decir, 150 milisegundos en contraste con 60 milisegundos. Por otra parte, el componente P300 presenta una morfología más complicada. Las réplicas del potencial evocado visual se incluyen

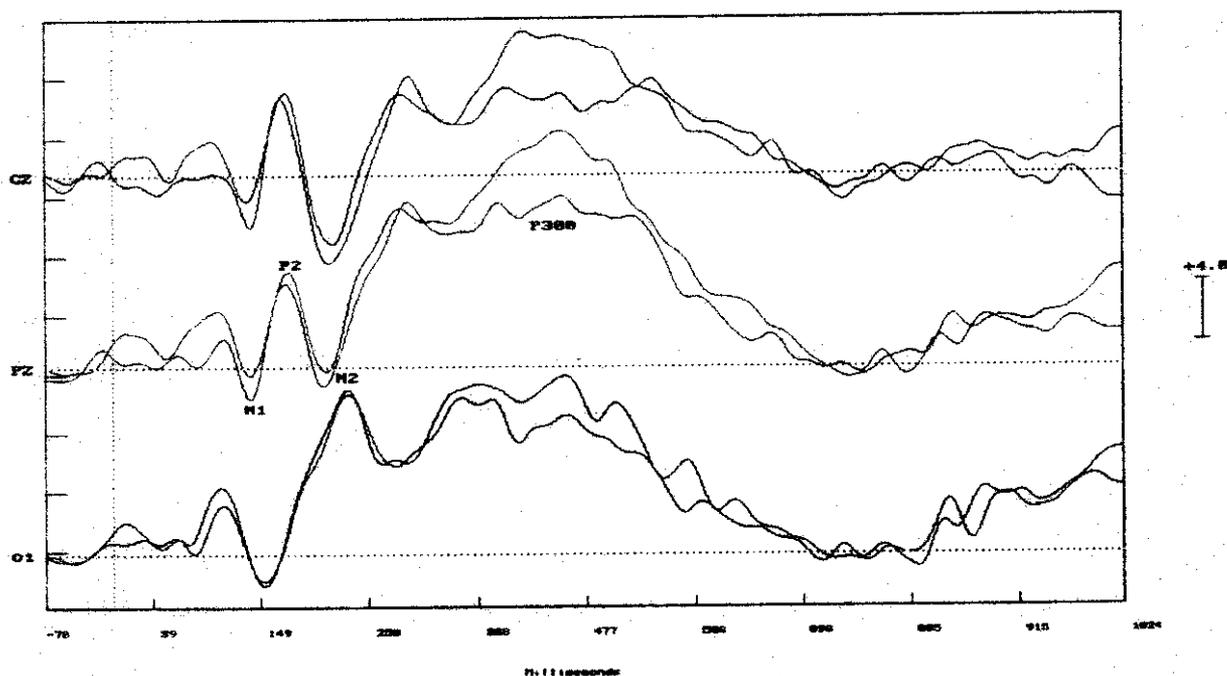


Figura VII.7.3.4. Réplicas del potencial evocado visual obtenidas promediando las épocas pares e impares.

en la figura VII.7.3.4 y certifican la autenticidad de cada uno de los componentes.

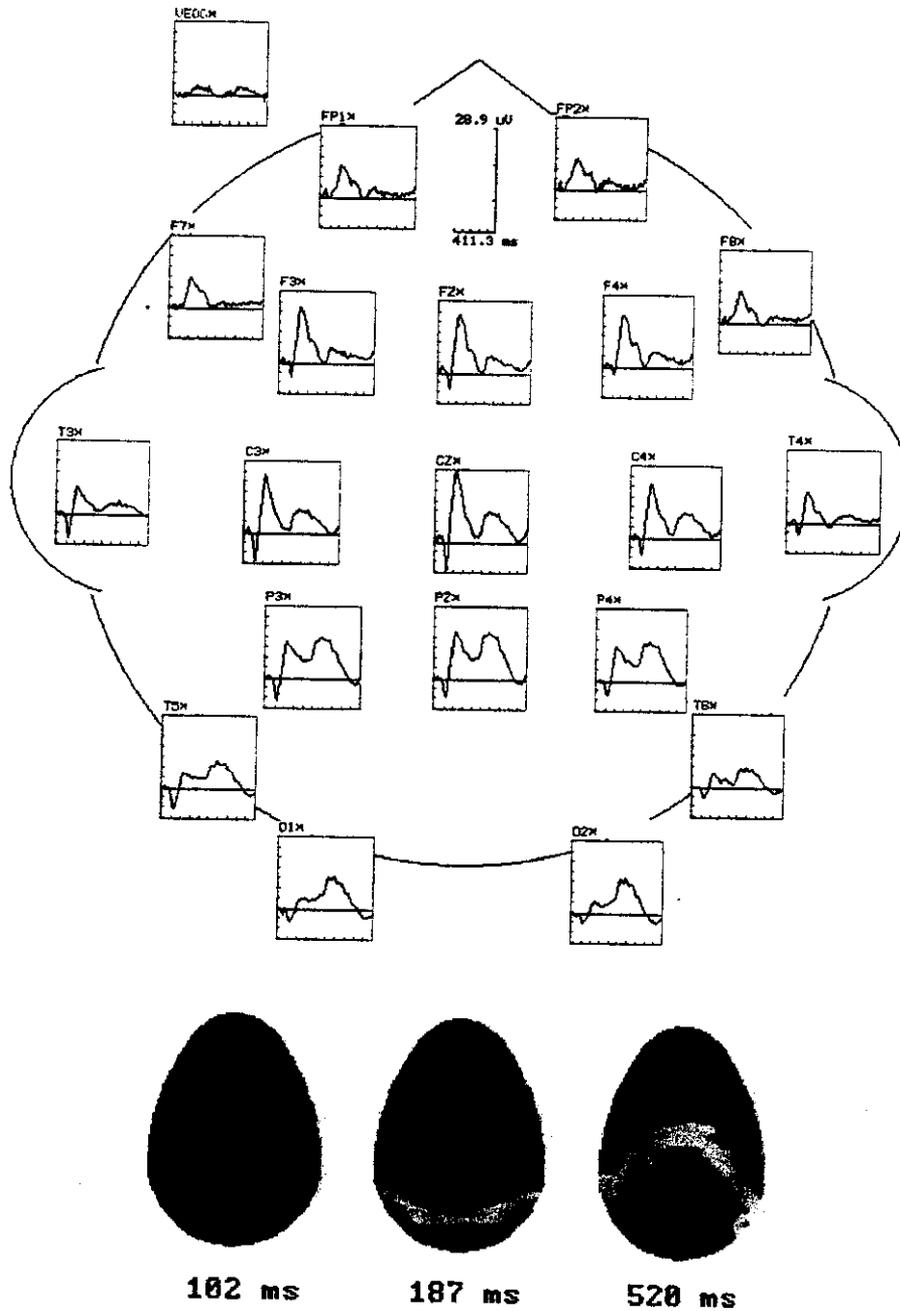


Figura VII.7.3.5. Distribución espacial del potencial evocado auditivo. Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

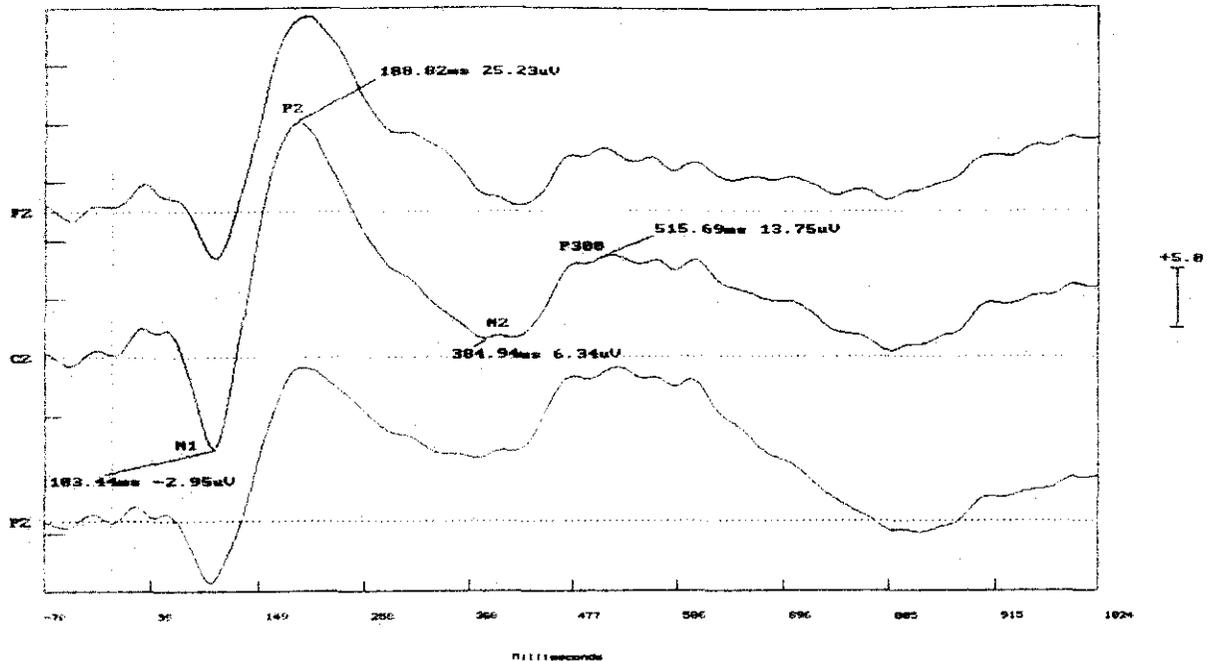


Figura VIII.7.3.6. Potencial evocado auditivo generado por la palabra "bird" en los electrodos Fz, Cz y Pz. Los diferentes componentes se etiquetan en el electrodo Cz, indicando sus latencias.

La distribución espacial del potencial auditivo evocado por la palabra pájaro se muestra en la figura VII.7.3.5. En la figura se puede observar la distribución típica de los componentes N1, P2 y P300. Sin embargo, es importante notar que existe una mayor duración de los componentes N1 y P2. En la figura VII.7.3.6 se puede observar que el componente N100 se genera alrededor de los 103 milisegundos, el componente P200 alrededor de los 188 milisegundos, el componente N200 alrededor de los 384 milisegundos mientras que el componente P300 se genera alrededor de los 515 milisegundos. Los componentes N2 y P300 parecen traslaparse. El proceso de cierre del potencial auditivo presenta una actividad que inicia en los 384 milisegundos y termina en los 806 milisegundos. En la figura VII.7.3.3 (b) se muestran las actividades auditivas del tercer y presente experimento, como puede observarse existen cambios relevantes alrededor de los componentes N2 y P300, sugiriendo procesos más complejos de detección, categorización y cierre de información. Las réplicas

del potencial auditivo se presentan en la figura VII.7.3.7 y confirman la reproducibilidad de los componentes exógenos y endógenos antes citados.

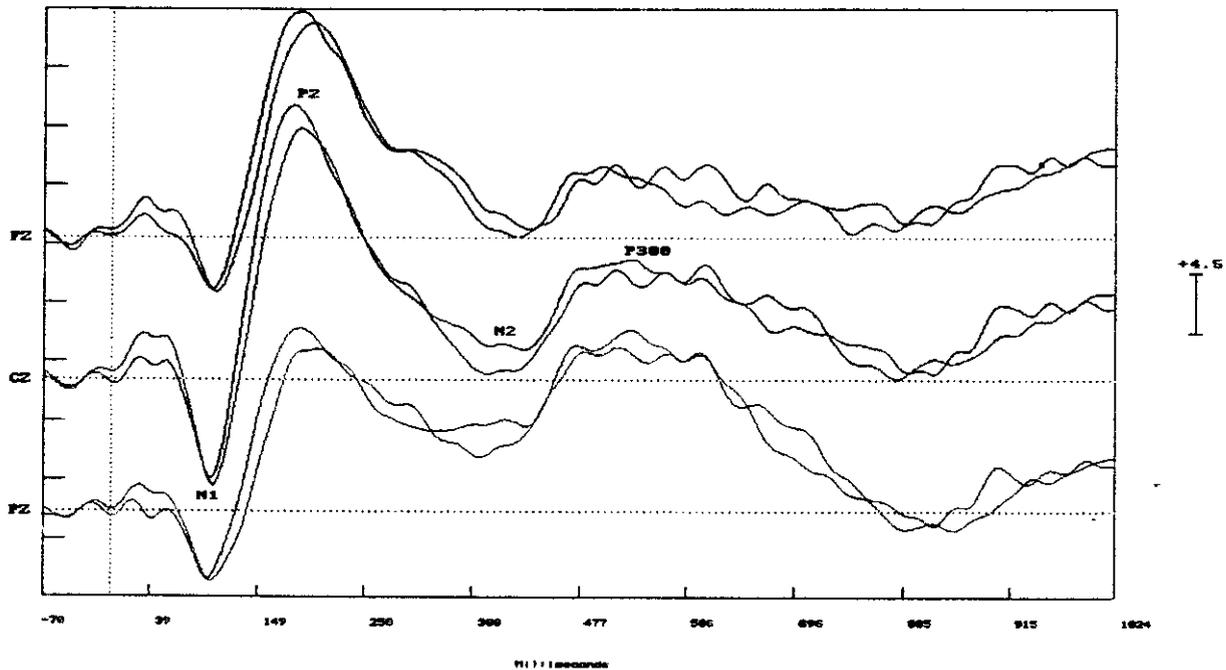


Figura VII.7.3.7. Réplicas del potencial evocado auditivo obtenidas promediandolas épocas pares e impares.

La distribución espacial del potencial evocado bimodal, correspondiente a la presentación simultánea de la palabra "bird" y el dibujo de un pájaro, se muestra en la figura VII.7.3.8. Los componentes exógenos N1 y P2 presentan una distribución amplia y central mientras que el componente endógeno P300 muestra su distribución típica localizada en la parte parietal. En la figura VII.7.3.9 se observa que el componente bimodal N1 se presenta alrededor de los 104 milisegundos, el componente P2 alrededor de los 175 milisegundos mientras que el componente P300 alrededor de los 434 milisegundos. La actividad bimodal difiere de las actividades bimodales obtenidas en los experimentos anteriores, después del componente P200 existen dos picos cognoscitivos bien

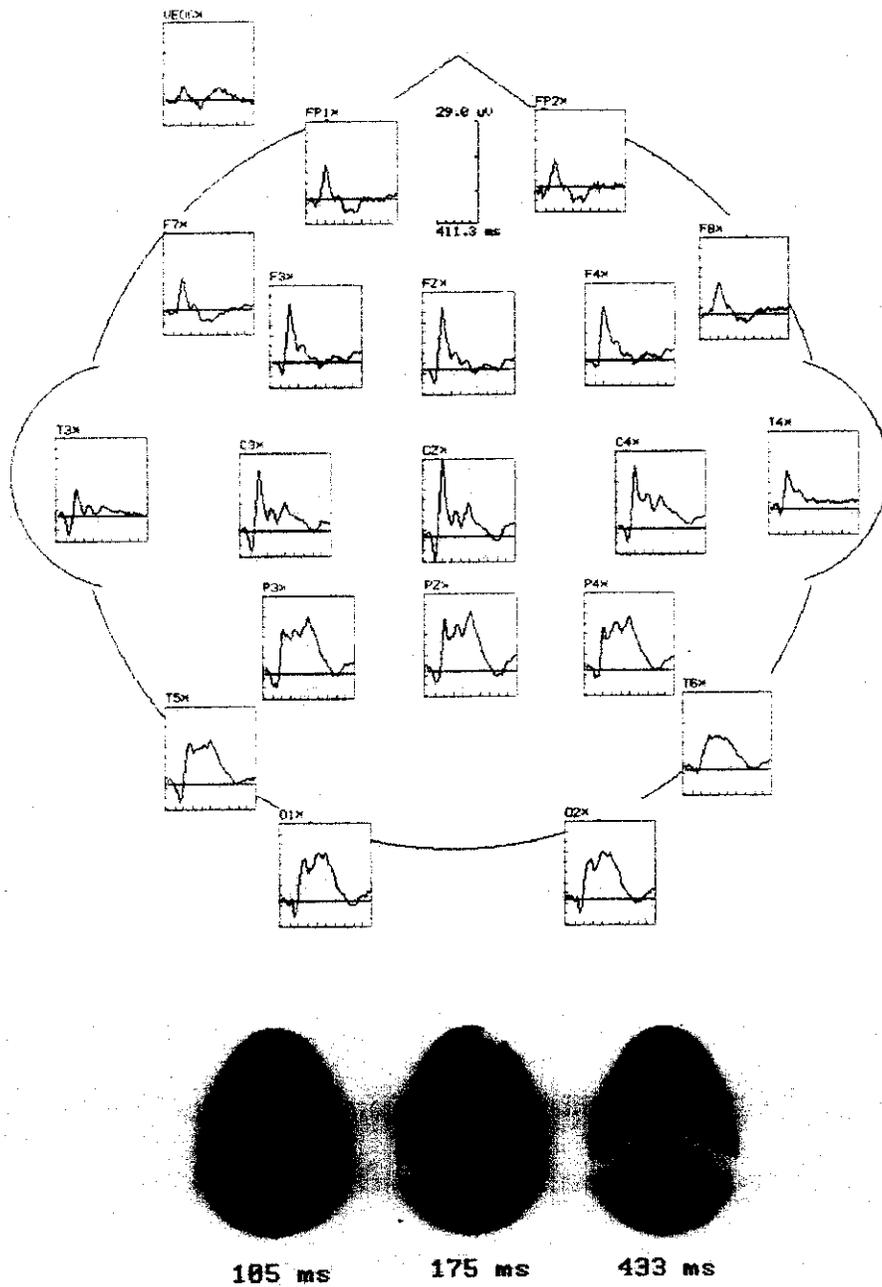


Figura VII.7.3.8. Distribución espacial del potencial evocado bimodal . Los mapas topográficos corresponden a la actividad eléctrica de los componentes N100, P200 y P300.

definidos. La actividad entre los componentes P2 y N2 podría relacionarse con la interacción del proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de pos-categorización del estímulo

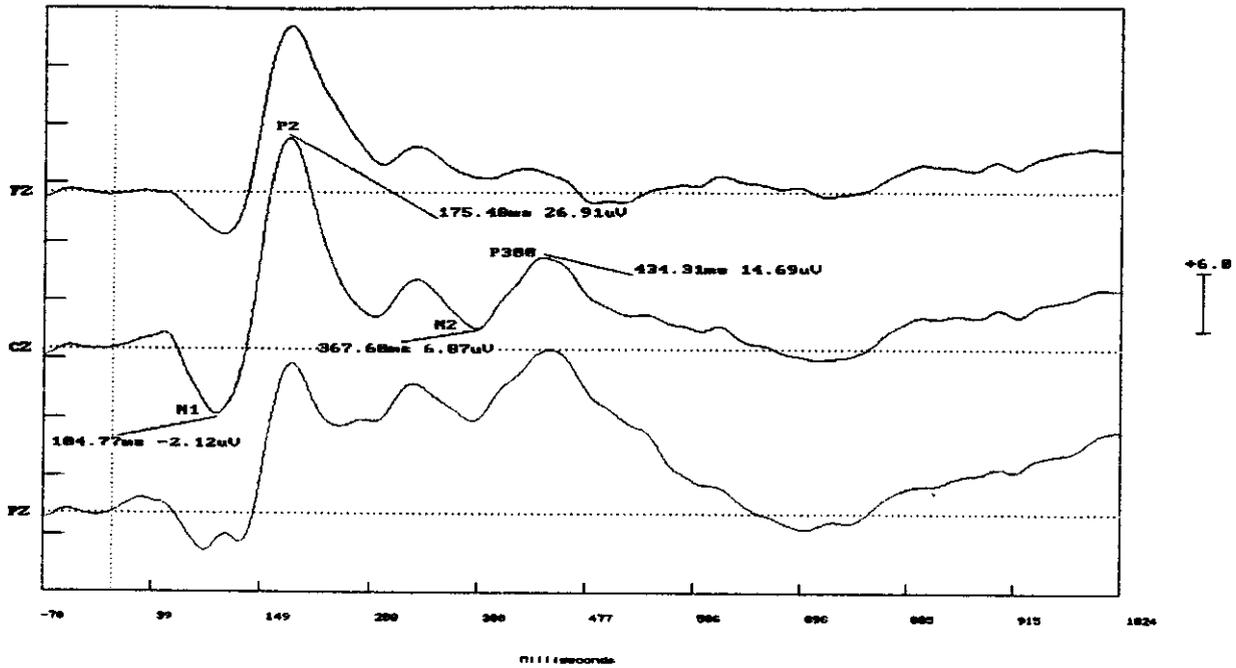


Figura VII.7.3.9. Potencial evocado bimodal generado por la presentación simultánea de la palabra "bird" y el dibujo de un pájaro.

visual. Los picos bimodales bien definidos, en comparación con los picos cognoscitivos traslapados

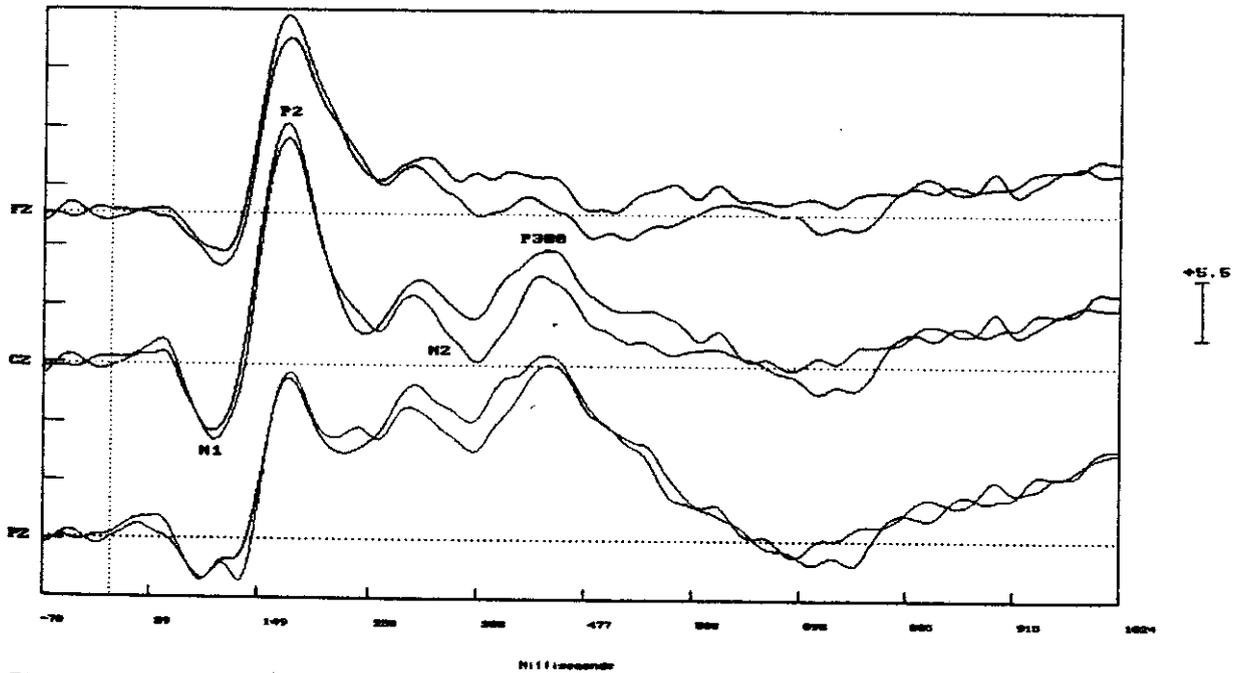


Figura VII.7.3.10. Réplicas del potencial evocado bimodal obtenidas promediando las épocas pares e impares.

de los experimentos anteriores, sugieren el desarrollo de procesos endógenos y exógenos mas complejos. Las réplicas del potencial evocado bimodal, mostradas en la figura VII.7.3.10, confirman la reproducibilidad de cada uno de los componentes exógenos y endógenos generados por el presente paradigma.

Los potenciales evocados bimodales generados por las combinaciones de estímulos "target" y "non-target" se muestran en la figura VII.7.3.11. De las cuatro actividades bimodales presentadas,

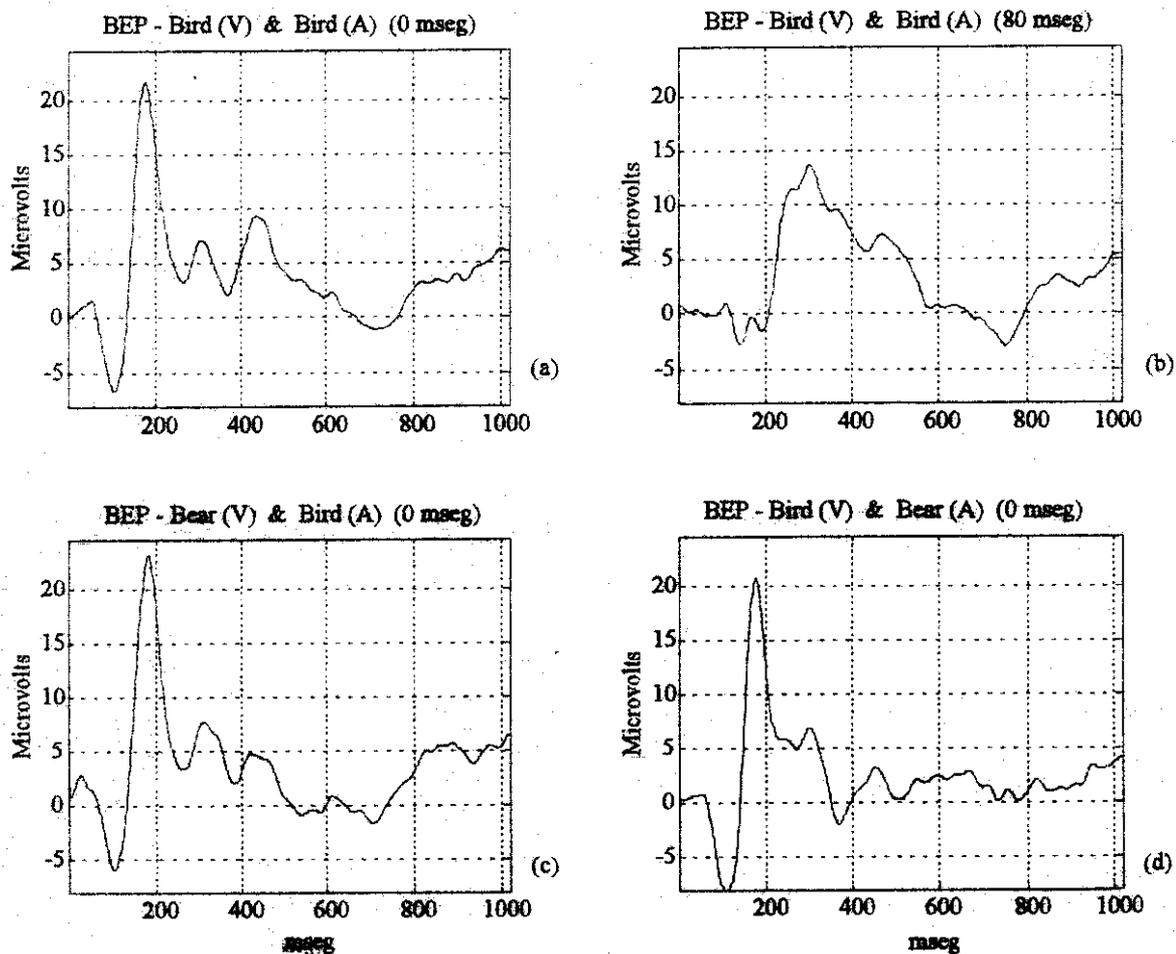


Figura VII.7.3.11. Potenciales evocados bimodales adquiridos. El sujeto presiona un botón en las condiciones experimentales (a) y (b) y evita generar una respuesta en las condiciones (c) y (d). Los potenciales evocados corresponden al electrodo Cz.

el proceso de cierre más prominente corresponde a la estimulación "target", figura VII.7.3.11 (a). Como puede observarse en la figura VII.7.3.11 (b), la morfología del potencial evocado generado al utilizar un retraso de 80 milisegundos cambia de forma importante en comparación con el potencial obtenido por estimulación simultánea.

En la figura VII.7.3.12 se muestran los potenciales bimodales adquiridos y sintetizados. Como puede observarse existen diferencias importantes tanto en los componentes exógenos como

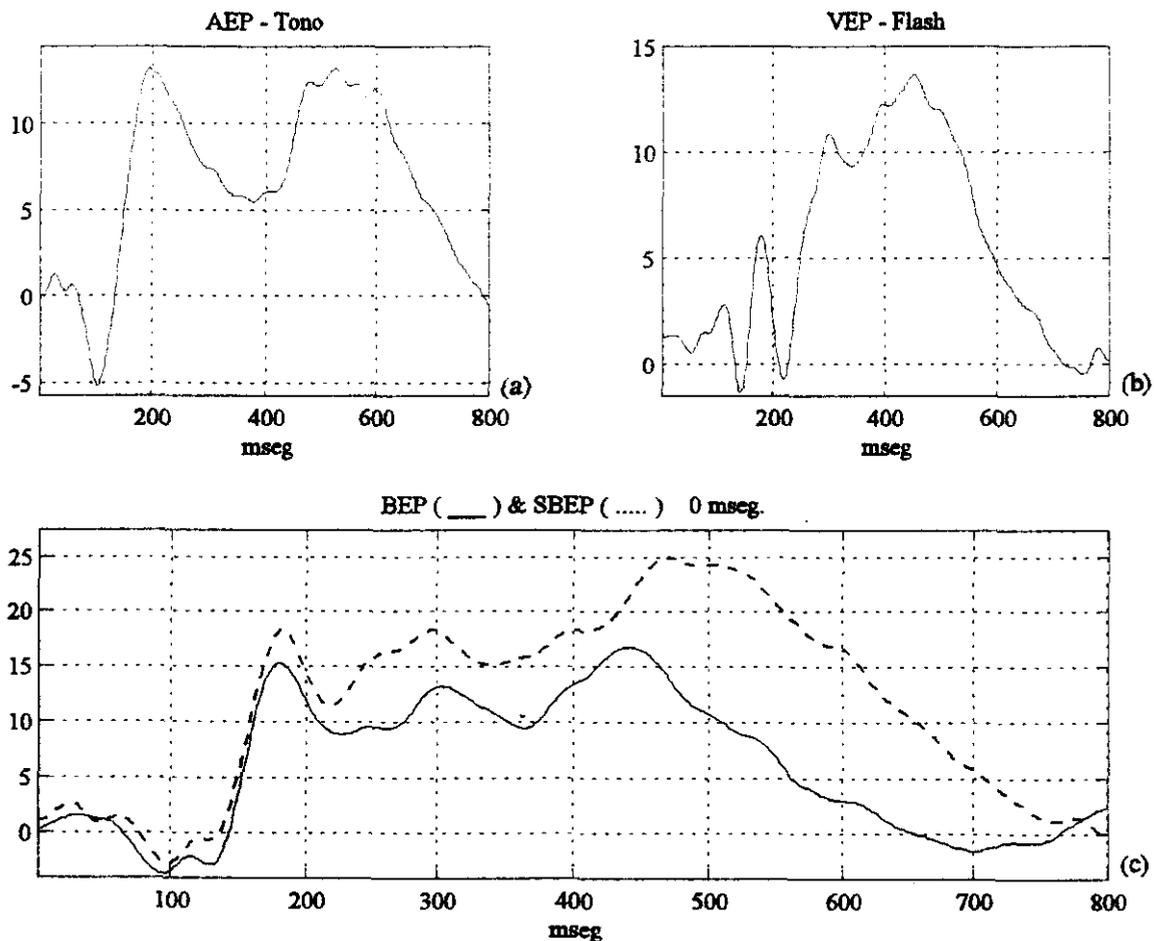


Figura VII.7.3.12. Potenciales evocados unimodales y bimodal en el electrodo Pz. (a) Potencial evocado auditivo (AEP) generado por la palabra "bird", (b) Potencial evocado visual (VEP) generado por el dibujo de un pájaro, (c) Potencial evocado bimodal (BEP) y potencial evocado bimodal sintetizado (SBEP), utilizando estimulación simultánea.

endógenos, siendo más evidente en el componente P300. Es evidente que la suma de las actividades unimodales no puede explicar el comportamiento del potencial evocado bimodal adquirido.

TABLA VII.6.1.
Valor promedio y desviación estándar de los tiempos de reacción unimodales y bimodales.

Tipo	Valor promedio	Desviación Estándar
Palabra "Bird"	0.500	0.079
Dibujo "Pájaro"	0.633	0.082
Dibujo - 0 mseg - Palabra	0.496	0.080
Dibujo - 80 mseg - Palabra	0.427	0.059

VII.7.4. Conclusiones

Procesos exógenos y endógenos más complejos son generados por estímulos, presentados en diferentes vías sensoriales, que tiene una relación cognoscitiva "natural". En el experimento se presentan en forma simultánea la palabra "bird" y el dibujo de un pájaro, resultando potenciales evocados con componentes endógenos bien definidos y presentados en forma tardía. El tiempo de reacción unimodal y bimodal se presenta en la tabla VII.7.1. El tiempo de reacción bimodal es menor que cualquiera de los tiempos de reacción para el estímulo auditivo y el estímulo visual. El hecho anterior indica la posibilidad de relaciones intersensoriales entre las vías auditiva y visual.

VII.8. Discusión General

En el presente capítulo se presenta el diseño de seis paradigmas orientados a evidenciar procesos cognoscitivos y en específico a evidenciar el fenómeno intersensorial. En los experimentos, la tarea del sujeto consistió en detectar la presencia de un estímulo "target" en una vía sensorial o la presencia simultánea de estimulación en las vías sensoriales visual y auditiva. En los primeros cinco experimentos se utilizan estímulos ortogonales, representados en la vía auditiva por tonos de diferentes frecuencias y en la vía visual por flashes de diferente color. En contraste, en el sexto experimento se utilizan dibujos y palabras que representan la misma información cognoscitiva, es decir, existe una relación "natural" entre el estímulo auditivo y visual. En el segundo y quinto experimento, el sujeto responde a un estímulo presentado en una vía sensorial mientras que en el tercer y cuarto experimento la tarea del sujeto consistió en detectar una combinación específica de estímulos ortogonales.

En el diseño de los experimentos, la discriminabilidad de los estímulos se incorporó como una variable importante con el propósito de observar los cambios morfológicos en los potenciales evocados bimodal y unimodales y en consecuencia, posibles cambios en el fenómeno intersensorial. Las actividades eléctricas adquiridas muestran comportamientos diferentes a lo largo de los experimentos. En cada experimento se compara el potencial evocado bimodal adquirido con la suma de los potenciales evocados unimodales, siendo evidente la discrepancia entre ambas actividades. Además, se muestran los diferentes potenciales evocados bimodales, generados por las diferentes combinaciones entre estímulos auditivo y visual, dentro de un mismo experimento y que demuestran que los componentes exógenos y endógenos del potencial evocado se relacionan con los diferentes procesos de decisión que origina el sujeto.

Resultados y Discusión del Modelo No-Lineal: Aplicación al Fenómeno Intersensorial

VIII.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados, de los seis paradigmas considerados en el presente trabajo, al aplicar la formulación del fenómeno intersensorial en términos de información lineal y no-lineal obtenida a partir de la actividad unimodal visual y auditiva. Cada una de las secciones corresponde a los resultados de un experimento y con el propósito de proporcionar una visión general se inicia cada sección con la presentación de los potenciales evocados unimodales y bimodales, en el electrodo Cz, así como los ajustes obtenidos al aplicar modelos lineales y no-lineales a las actividades adquiridas. La sección continúa con el análisis no-lineal de las actividades eléctricas adquiridas y en consecuencia, con el análisis del fenómeno intersensorial para el electrodo Cz. El análisis se realiza en diferentes ventanas de tiempo definidas de acuerdo a los criterios propuestos en el capítulo III. Es importante señalar que las ventanas de análisis para los seis experimentos reportados en la presente tesis pueden ser de diferente duración de acuerdo a la evolución temporal de los eventos cognoscitivos que se generen. Sin embargo, para todos los experimentos las actividades eléctricas unimodales y bimodales se adquieren con una duración de 1024 milisegundos. En cada sección, los resultados del modelo no-lineal se presentan proporcionando la gráfica del potencial evocado bimodal sintetizado obtenido como la suma de las contribuciones lineales y no-lineales, la gráfica de la contribución no-lineal asociada con el fenómeno intersensorial y obtenida al sumar productos de información visual y auditiva, la gráfica de la suma de la actividad no-lineal generada por la vía auditiva o visual denominada fenómeno intrasensorial y la gráfica de la información obtenida al sumar la actividad intrasensorial y la actividad correspondiente a la parte

lineal del modelo denominada modelo de sumación de energías. Después del análisis en el electrodo Cz se analiza la dependencia espacial del fenómeno intersensorial, para este propósito se utiliza una representación horizontal y vertical de las actividades unimodales y bimodal adquiridas. Las actividades se muestran por columnas, en la primera columna se reporta la actividad auditiva, en la segunda columna la actividad visual y en la tercera columna la actividad bimodal. En la representación horizontal, el primer renglón incluye la actividad de los electrodos Fp1 y Fp2. En cada representación la actividad eléctrica se despliega del hemisferio izquierdo, parte inferior de la representación, hacia el hemisferio derecho. En la representación vertical el primer renglón representa la actividad eléctrica de los electrodos F7, T3 y T5. En ambas representaciones la actividad se muestra de la región occipital, en la parte inferior de la representación, a la región frontal. Con propósitos de representación las actividades se normalizan, es decir el mínimo corresponde a un color azul oscuro mientras que el máximo corresponde a un rojo oscuro. Las unidades del eje horizontal corresponden a muestras del potencial evocado, cada muestra corresponde a 2 milisegundos. Para complementar la información espacial y apoyar la discusión de los resultados se incluyen mapas topográficos con una duración de 8 milisegundos. La hipótesis acerca del comportamiento espacial para el presente y los siguientes experimentos es como sigue:

- El modelo de sumación de energías y el fenómeno intersensorial son dependientes de la posición del electrodo, es decir, existe una dependencia espacial.
- El modelo de sumación de energías y el fenómeno intersensorial varían de acuerdo al paradigma y posiblemente reflejen la dificultad de la tarea asignada al sujeto.

Finalmente en cada sección se anexan tablas que muestran los coeficientes identificados del modelo no-lineal. En la presentación del análisis no-lineal, los resultados del modelo se reportan utilizando $u_a(n)$ para representar la actividad eléctrica auditiva y $u_v(n)$ para representar la actividad eléctrica visual.

VIII.2. Experimento # 1

El objetivo del primer experimento es analizar posibles interacciones entre las vías sensoriales visual y auditiva cuando en el paradigma no se establece ninguna relación entre los estímulos y no se asigna alguna tarea al sujeto. En la figura VIII.2.1(a) se muestran los potenciales evocados unimodales y bimodales adquiridos en el electrodo Cz, en una ventana de tiempo de 60 a 432 milisegundos. Como puede observarse, la morfología del potencial evocado bimodal esta más

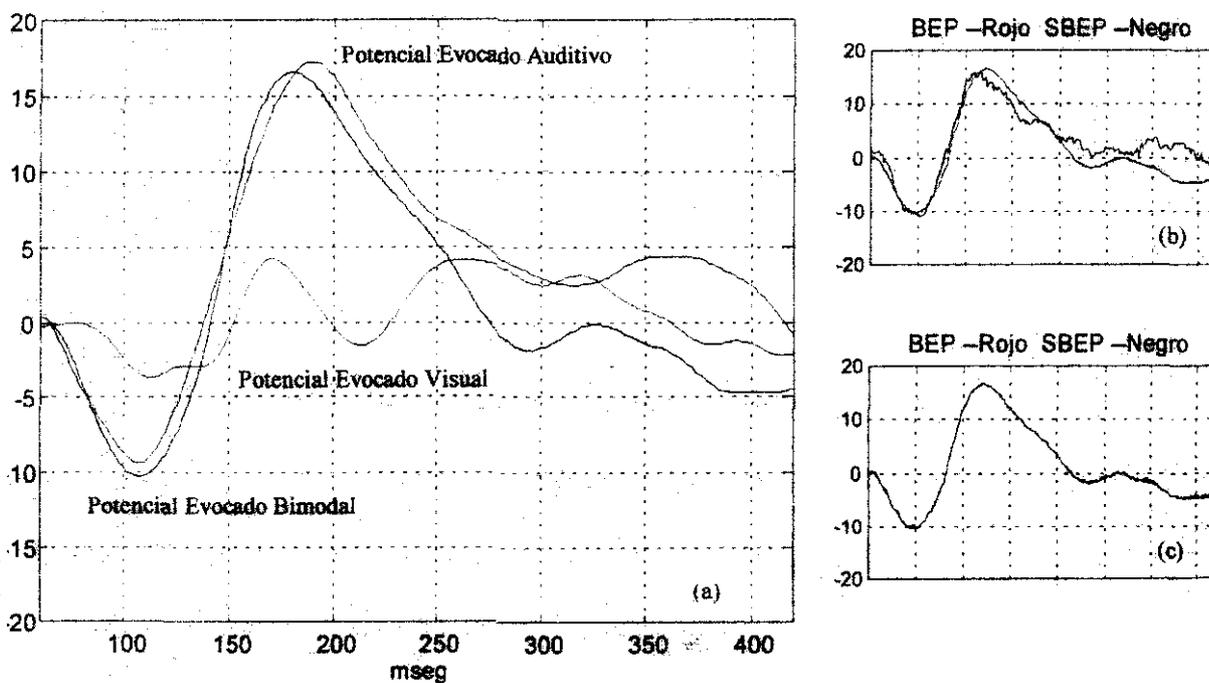


Figura VIII.2.1. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

relacionada con la morfología del potencial evocado auditivo. Sin embargo, existen desviaciones significativas a diferentes latencias y un modelo lineal del potencial evocado bimodal, figura VIII.2.1(b), no es suficiente para explicar su generación. En la figura VIII.2.1(c) se muestra un mejor ajuste al utilizar un modelo no-lineal global del potencial evocado bimodal.

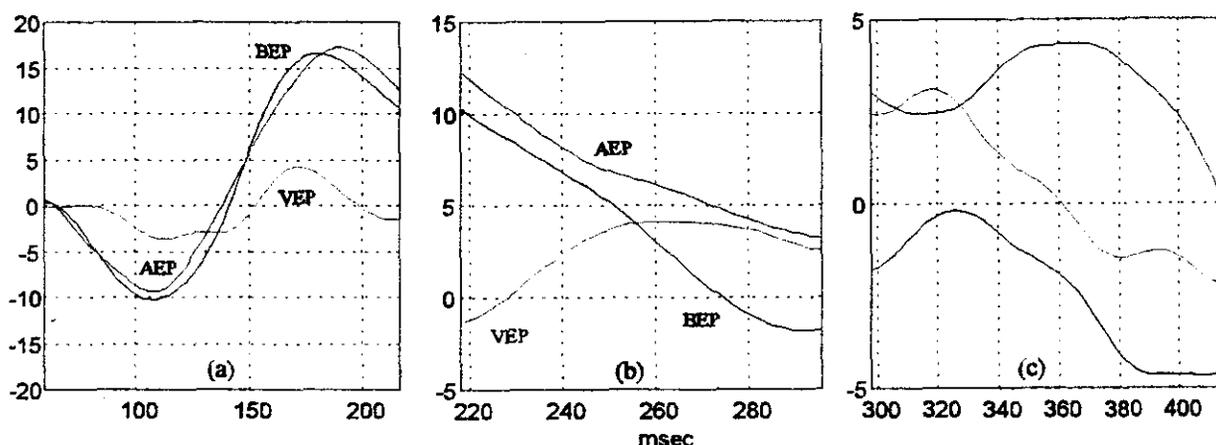


Figura VIII.2.2. Ventanas de tiempo. Se muestra el potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP).

VIII.2.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz

De acuerdo a la segmentación propuesta de las actividades adquiridas, mostradas para el electrodo Cz en la figura VIII.2.2(a), la primera ventana de análisis se define de los 60 a los 216 milisegundos. En esta ventana se incluye la detección de los estímulos visual y auditivo y la categorización del estímulo visual. Los resultados del modelo no-lineal se presentan en la figura VIII.2.3. La actividad relacionada con el modelo de sumación de energías, figura VIII.2.3(e), como es de esperarse se parece a la actividad del potencial evocado bimodal adquirido. La principal

contribución se origina de la vía sensorial auditiva y se refleja en el valor del coeficiente de 0.977, tabla VIII.2.1. La información hasta los 140 milisegundos sugiere que la detección de los estímulos visual y auditivo, indexado por el componente bimodal N100, es predominantemente generado por la combinación lineal de los procesos de detección de los estímulos unimodales, figura VIII.2.3(c). Sin embargo, esta presente actividad intersensorial y su importancia será explorada mediante un análisis espacial. A partir de los 140 milisegundos existe un incremento en la actividad del fenómeno intersensorial que puede estar relacionada con la interacción entre el proceso de categorización visual

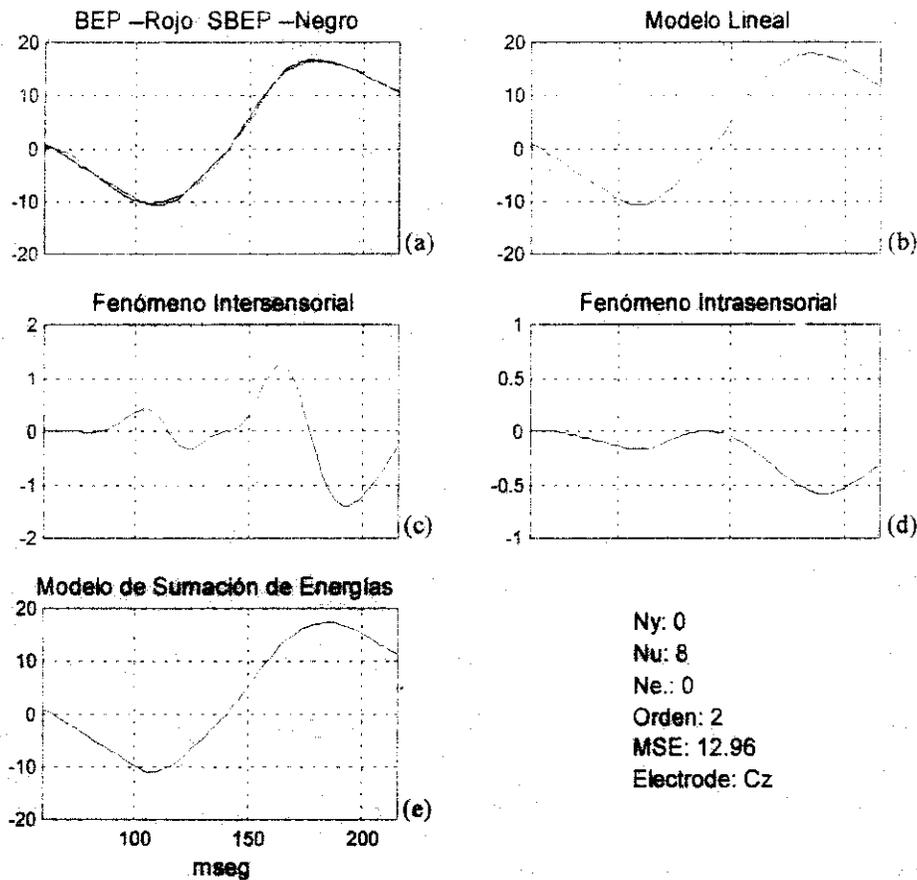


Figura VIII.2.3. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

y la decodificación de las características del estímulo auditivo indexado por el componente P200 del potencial evocado bimodal.

La segunda ventana de tiempo definida a partir de los 218 a los 296 milisegundos, figura VIII.2.2(b), incluye el componente visual P300a y la etapa de categorización del estímulo auditivo. Es importante observar que el componente bimodal N200 se genera antes que el componente auditivo N200. Los resultados del modelo no-lineal, figura VIII.2.4, indican que la salida del modelo depende de la contribución del modelo de sumación de energías así como de la actividad del fenómeno

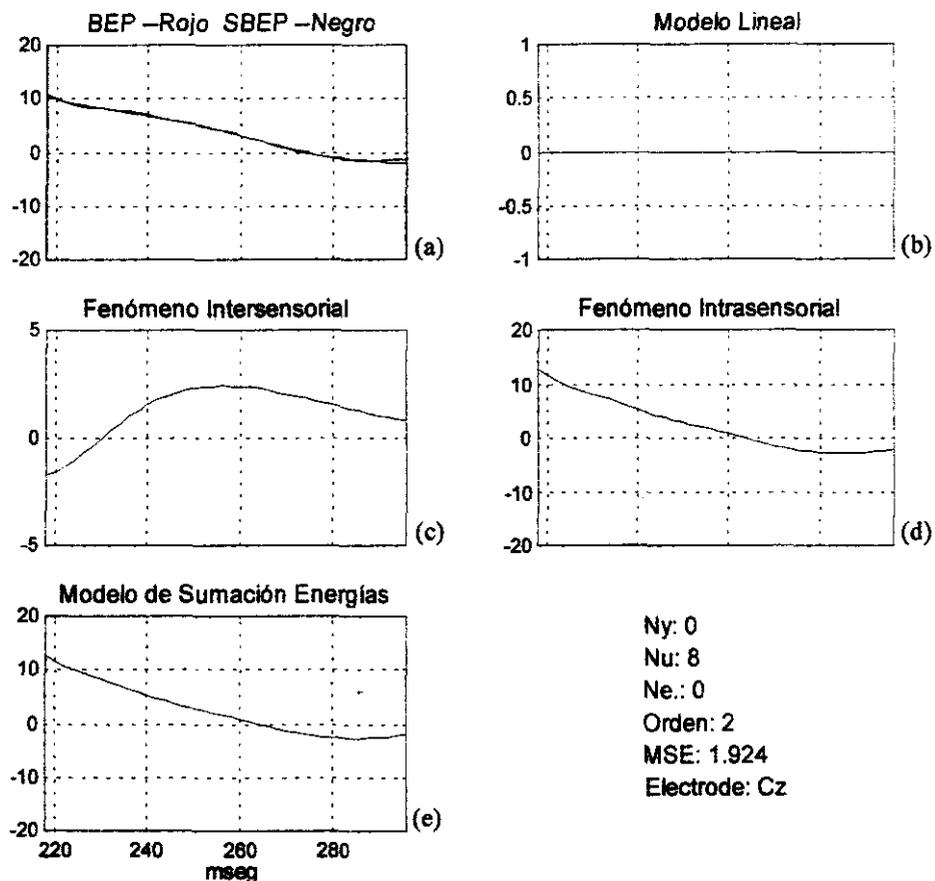


Figura VIII.2.4. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

intersensorial. A pesar de que la señal generada por el modelo de sumación de energías se parece al potencial evocado bimodal, es necesario la presencia de actividad intersensorial para explicar completamente la génesis del potencial bimodal. Es posible que el componente visual P300a interactúe en forma no-lineal con la información auditiva, resultando en un proceso de categorización bimodal más corto en duración. En los siguientes experimentos, en donde la discriminabilidad de los estímulos se decrementa, el comportamiento de las actividades unimodales y bimodales, en esta ventana de tiempo, se analizará y se realizarán comparaciones con los resultados obtenidos en el presente experimento. Debido a que en el paradigma no se asignó tarea al sujeto, el análisis del componente cognoscitivo P300 es pospuesto para experimentos en donde el sujeto tiene que generar un proceso de decisión.

TABLA VIII.2.1
Coefficientes del Modelo No-Lineal

Ventana # 1		Ventana # 2	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.977	$u_A(n-1)$	+0.095	$u_A(n-1)*u_V(n-2)$
+0.475	$u_V(n-1)$	+0.406	$u_A(n-3)*u_A(n-8)$
-0.002	$u_A(n-1)*u_A(n-2)$	-0.299	$u_A(n-7)*u_A(n-8)$
+0.026	$u_A(n-1)*u_V(n-2)$	-0.241	$u_V(n-7)*u_V(n-8)$
-0.185	$u_A(n-6)*u_V(n-8)$		
+0.155	$u_A(n-7)*u_V(n-8)$		

VIII.2.2 Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

El análisis espacial se presenta para las actividades eléctricas de los electrodos F3, Fz, F4, C3, C4, P3, Pz y P4. Las actividades eléctricas unimodales y bimodal se muestran en una representación horizontal y vertical, figuras VIII.2.5-6. En la representación horizontal, figura VIII.2.5, se puede

observar que la actividad auditiva presenta un primer componente exógeno negativo localizado en la región del vertex que se decrementa hacia las regiones frontales y occipitales, la actividad es mayor en el renglón F7-F8 que en el renglón T5-T6. Posteriormente, existe una combinación de componentes exógenos y componentes relacionados al proceso de categorización del estímulo, actividad que presenta una distribución fronto-central. La actividad eléctrica del electrodo Cz, a partir de los 298 a los 416 milisegundos, en color verde-amarillo, presenta una distribución parietal. La

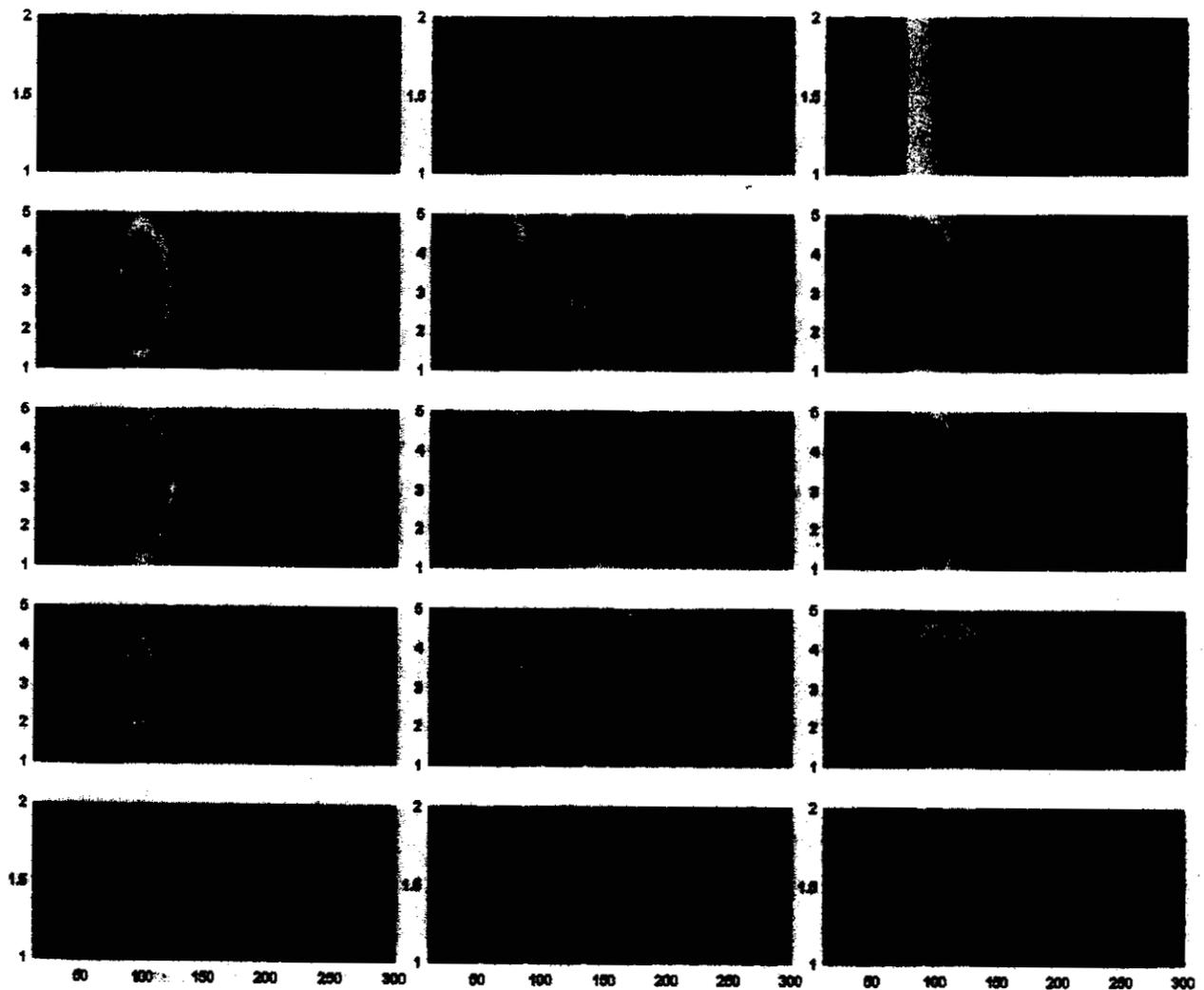


Figura VIII.2.5. Representación horizontal de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos occipitales del sistema 10-20.

actividad visual muestra que sus componentes exógenos están localizados principalmente en las regiones parietal y occipital mientras que el proceso de categorización del estímulo es más intenso en la región parietal. En el caso de la actividad bimodal, el componente exógeno negativo más prominente está localizado en el vertex y se propaga hacia las regiones parietal y frontal del cerebro. El componente positivo exógeno más prominente presenta una distribución fronto-central. La amplitud del proceso de cierre bimodal parece ser más intensa en la región parietal que en la región

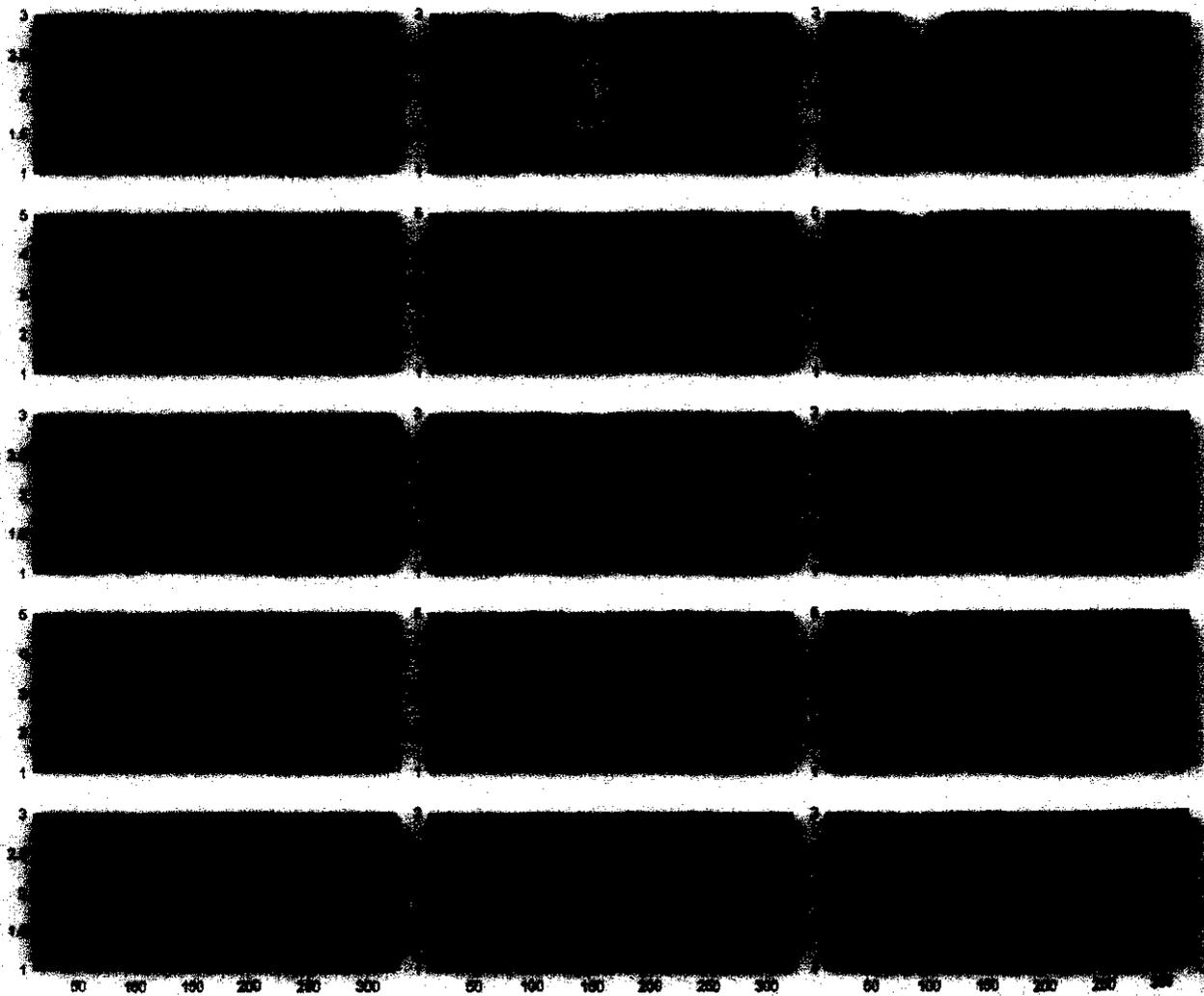


Figura VIII.2.6. Representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos F8, T4 y T6 del sistema 10-20.

frontal.

En la representación vertical, figura VIII.2.6, las actividades exógenas y cognitivas auditiva parecen tener simetría, en contraste con los componentes exógenos visuales que presentan una lateralización izquierda y los componentes cognoscitivos con lateralización derecha. En el caso bimodal, el componente exógeno negativo parece tener simetría mientras que la actividad combinada del componente exógeno positivo y del proceso de categorización del estímulo presentan una ligera lateralización derecha. El proceso de cierre bimodal, como se ha mencionado, tiene una amplitud pequeña y parece estar lateralizado.

Con el propósito de facilitar la identificación de los eventos bimodales, en la figura VIII.2.7, se presenta los mapas topográficos con una duración de 8 milisegundos. Como puede observarse el componente bimodal "N100" se encuentra formado por dos ondas relacionadas con la detección del estímulo auditivo y visual. La actividad bimodal se inicia siguiendo la actividad auditiva y



Figura VIII.2.7. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

posteriormente conmuta a la información visual. Este comportamiento denominado fenómeno de "switch" se muestra con mayor detalle en la figura VIII.2.8. La distribución espacial del componente bimodal N100 muestra que la primera onda tiene una distribución fronto-central mientras que la segunda onda tiene una distribución parietal-occipital.

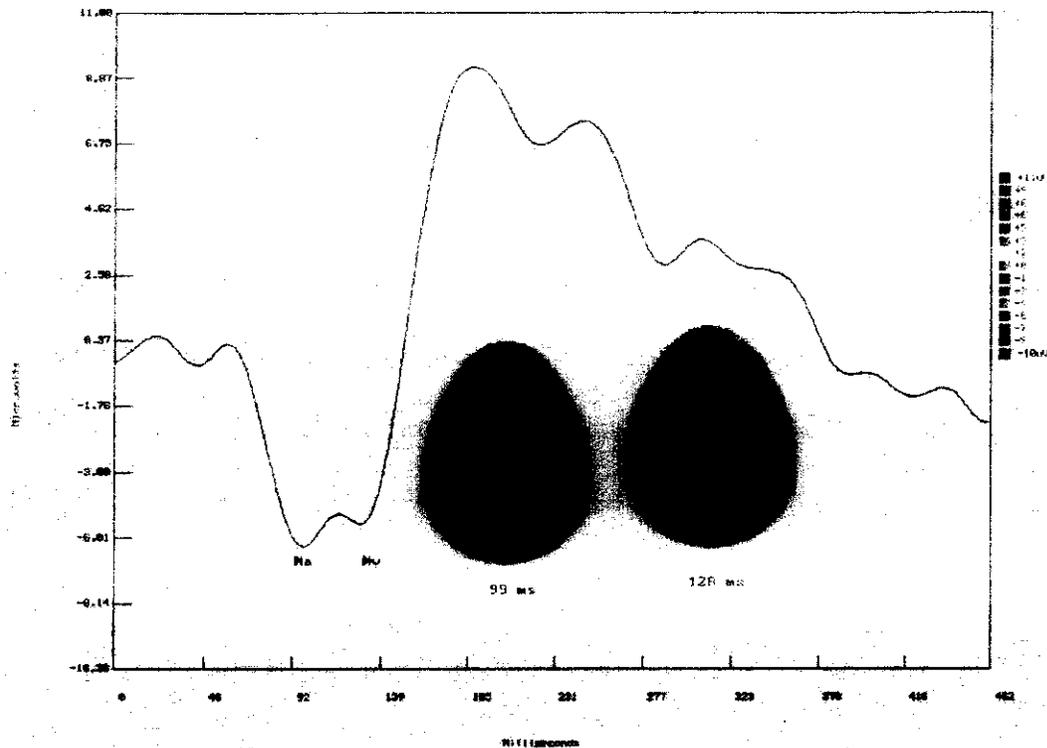


Figura VIII.2.8. Distribución espacial del componente bimodal N100.

VIII.2.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Linear

En la primera ventana de análisis, figura VIII.2.9, el potencial evocado bimodal, en la región frontal y central, se parece más a la actividad auditiva que a la actividad visual. Sin embargo, el componente bimodal P200, en la región frontal, muestra desviaciones con respecto al componente auditivo, posiblemente debido al traslape entre el proceso de categorización del estímulo visual y el proceso de decodificación del estímulo auditivo.

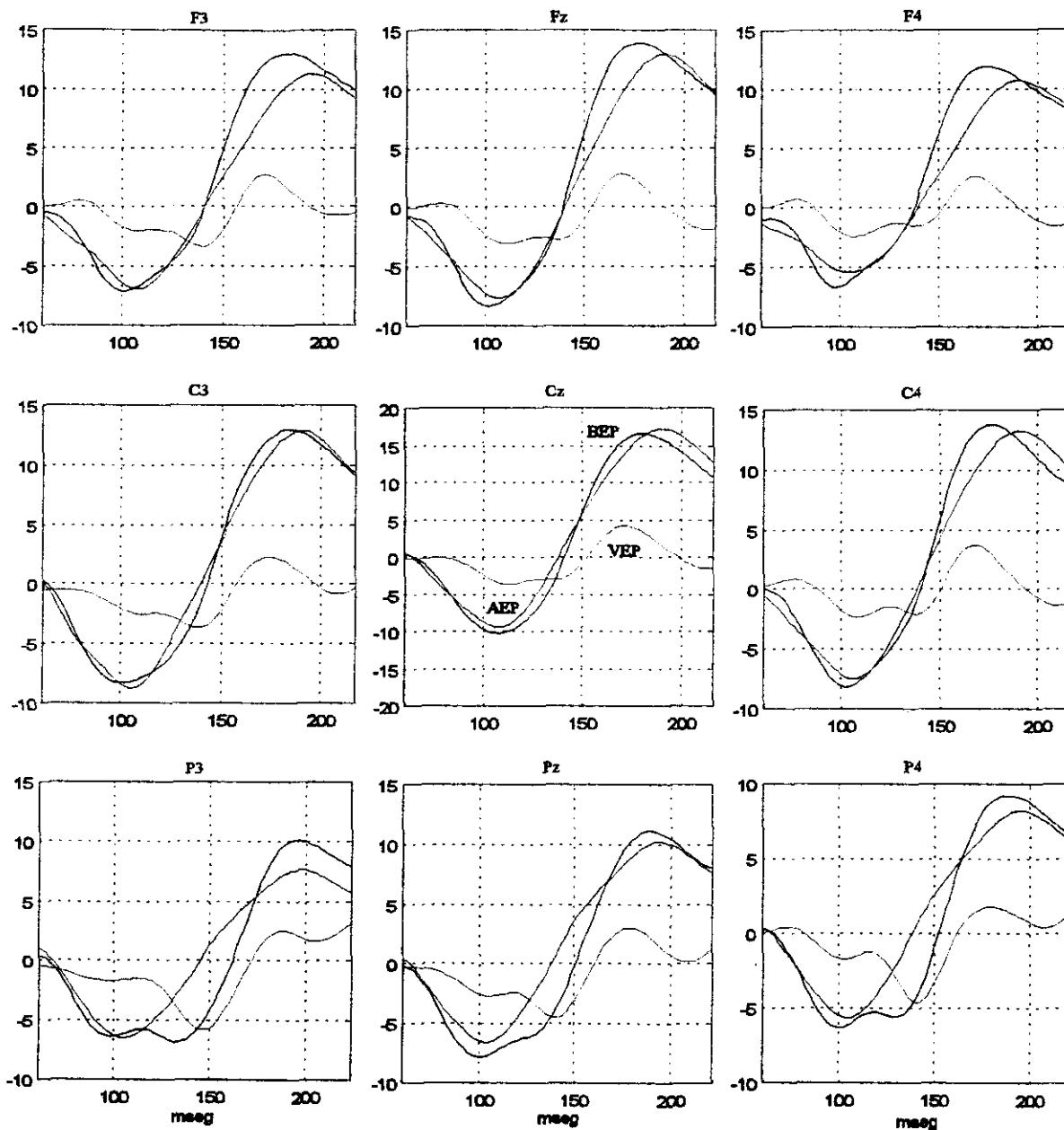


Figura VIII.2.9. Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea.

Los resultados espaciales del modelo no-lineal para la primera ventana de tiempo se presentan en la tabla VIII.2.2. La relevancia de la contribución de la vía sensorial auditiva se refleja en la importancia de los coeficientes del modelo asociados con la señal $u_A(n)$, tabla VIII.2.2. Los

coeficientes relacionados con la actividad auditiva se incrementan de 0.805 en el electrodo P3 a 1.050 en el electrodo F3. En contraste, la actividad visual $u_v(n)$ decrementa de 0.992 en P3 a 0.762 en el electrodo F3. Los coeficientes del modelo no-lineal reportados en la tabla VIII.2.2 y los

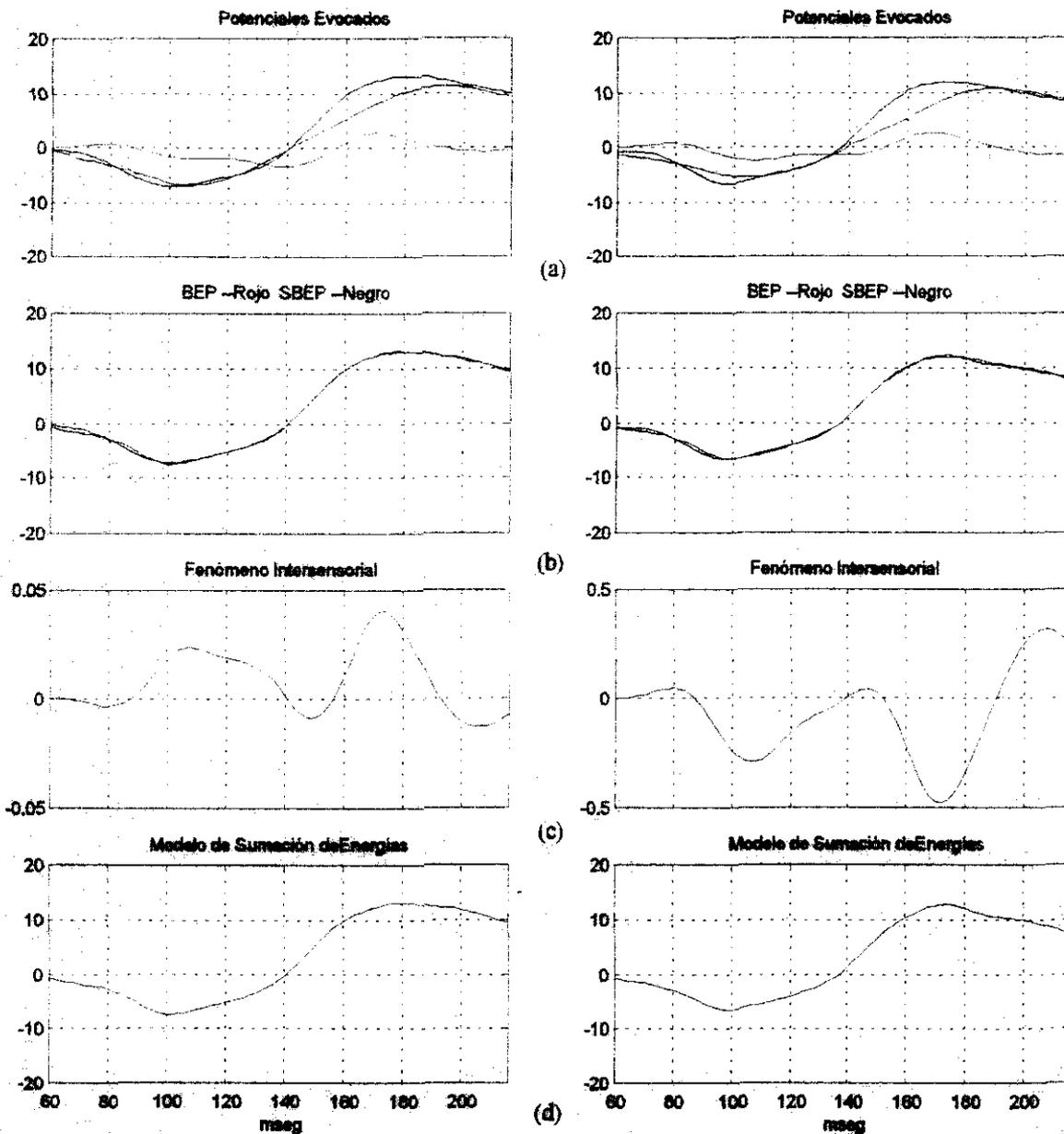


Figura VIII.2.10. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos F3 y F4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

resultados mostrados en las figuras VIII.2.10-12 indican que la contribución no-lineal tiene una lateralización derecha. El comportamiento anterior puede tener relación con la lateralización mencionada en los párrafos anteriores y que se observa de forma más clara en la representación de

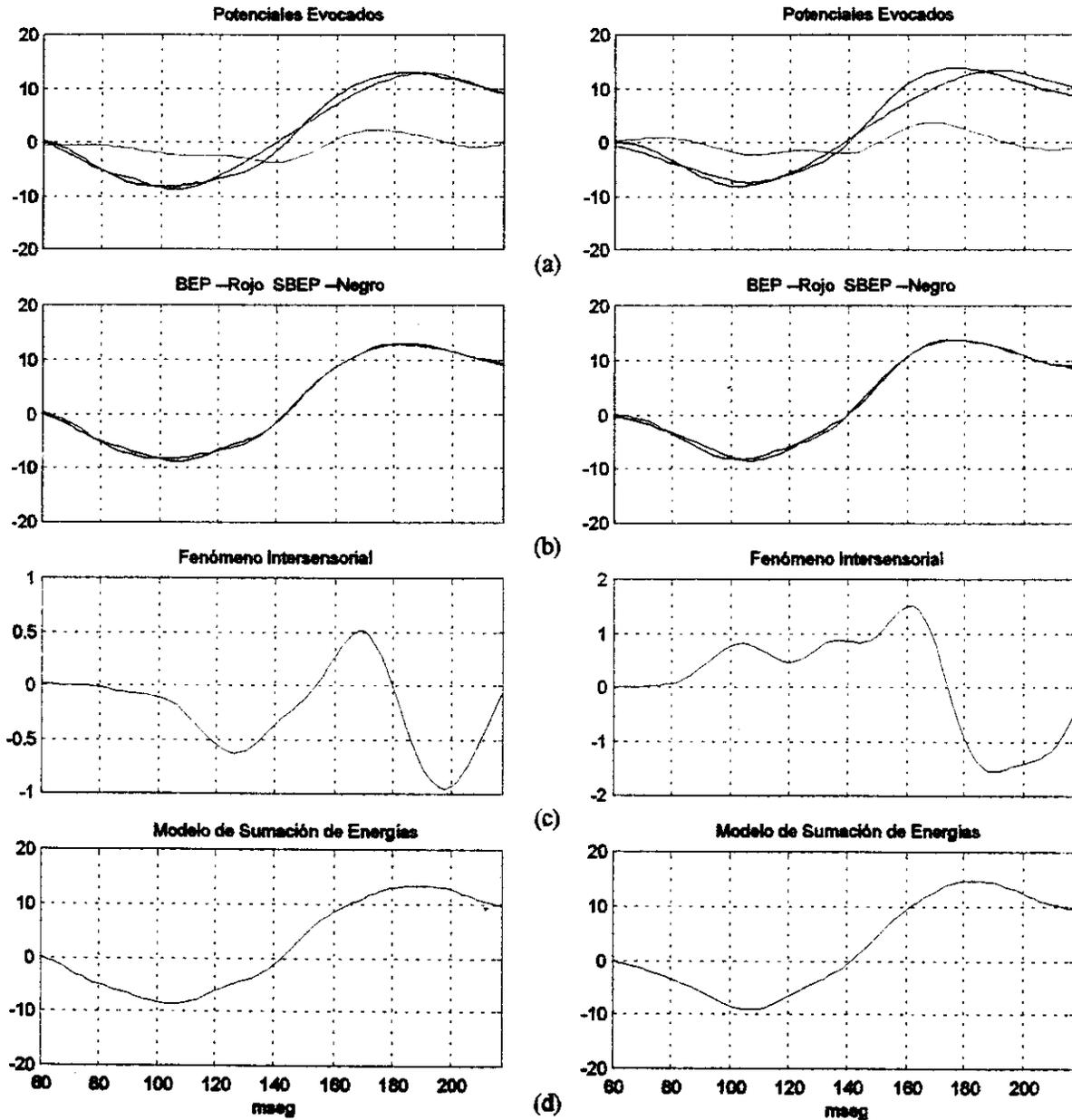


Figura VIII.2.11. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos C3 y C4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

la actividad visual. Los resultados del modelo no-lineal, en los electrodos F3, C3, y P3, indican que el modelo de sumación de energías explica la génesis del potencial evocado bimodal, como puede observarse de las figuras VIII.2.10(d)-12(d). La contribución intersensorial es pequeña con respecto

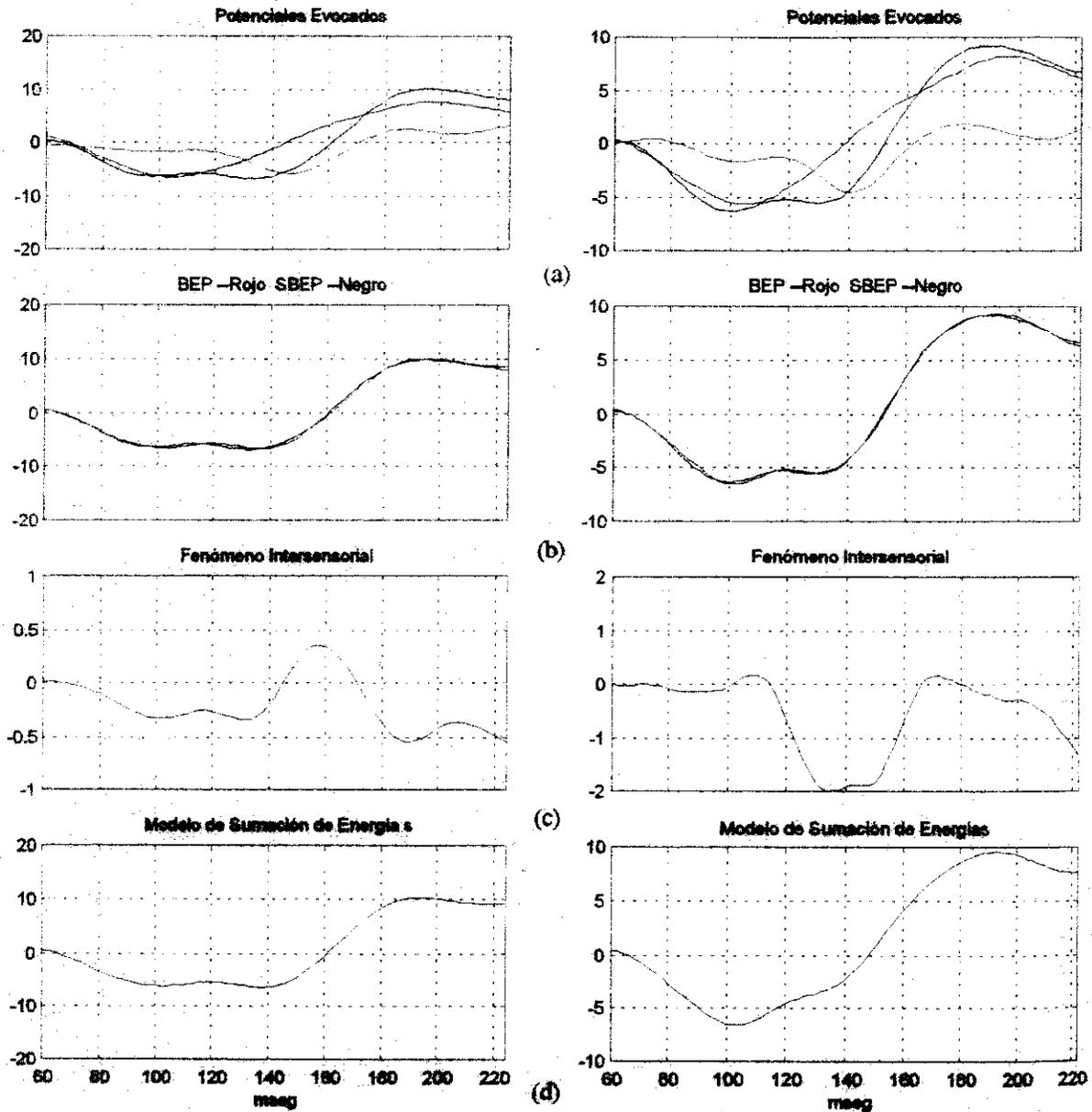


Figura VIII.2.12. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos P3 y P4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

de la actividad generada por el modelo de sumación de energías. En contraste, para los electrodos F4, C4 y P4, la actividad intersensorial se incrementa, siendo más intensa en la región parietal. En la columna de electrodos Fz, Cz y Pz, el modelo no incluye términos no-lineales en el electrodo Fz, siendo la contribución intersensorial mayor en comparación con la contribución intersensorial en los

TABLE VIII.2.2

Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements
+1.050	$u_A(n-1)$	+1.051	$u_A(n-1)$	+0.642	$u_A(n-1)$	+0.973	$u_A(n-1)$
+0.762	$u_V(n-1)$	+0.126	$u_A(n-8)$	+0.484	$u_A(n-3)$	+0.003	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
-0.583	$u_V(n-8)$	+0.338	$u_V(n-1)$	+0.661	$u_V(n-1)$	-0.033	$u_A(n-8)u_V(n-12)$
+0.038	$-u_A(n-1)u_A(n-2)$	-1.044	$u_V(n-8)$	-0.473	$u_A(n-1)u_A(n-10)$	-0.074	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
-0.454	$u_A(n-1)u_A(n-6)$	+0.039	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.022	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.381	$u_V(n-4)u_V(n-12)$
+0.002	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.046	$u_A(n-7)u_A(n-8)$	+0.041	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.355	$u_V(n-7)u_V(n-8)$
+0.317	$u_A(n-2)u_A(n-4)$			+0.377	$u_A(n-6)u_A(n-8)$		
+0.100	$u_A(n-4)u_A(n-6)$			-1.050	$u_V(n-1)u_V(n-10)$		
+0.069	$u_V(n-7)u_V(n-8)$			+0.984	$u_V(n-5)u_V(n-6)$		

C4		P3		Pz		P4	
+1.027	$u_A(n-1)$	+0.805	$u_A(n-1)$	+1.093	$u_A(n-1)$	+1.080	$u_A(n-1)$
+0.646	$u_V(n-1)$	+0.074	$u_A(n-6)$	-0.317	$u_A(n-4)$	-0.081	$u_A(n-5)$
-0.103	$u_A(n-1)u_V(n-8)$	+0.992	$u_V(n-1)$	+1.037	$u_V(n-1)$	+0.644	$u_V(n-1)$
+0.119	$u_A(n-8)u_V(n-4)$	-0.030	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.217	$u_V(n-12)$	-0.159	$u_A(n-1)u_V(n-5)$
-0.026	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	+0.027	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.017	$u_A(n-1)u_A(n-5)$	-0.088	$u_A(n-1)u_V(n-6)$
+0.046	$u_V(n-7)u_V(n-8)$			-0.044	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.793	$u_A(n-5)u_V(n-5)$
						+0.011	$u_A(n-7)u_V(n-8)$
						-0.434	$u_A(n-8)u_V(n-3)$
						-0.203	$u_A(n-8)u_V(n-8)$

electrodos F3-P3. El modelo no-lineal del fenómeno de "switch" y del componente bimodal P200 genera una actividad intersensorial pequeña en comparación con la actividad reflejada por el modelo

de sumación de energías. Ambos componentes se generan principalmente por la combinación

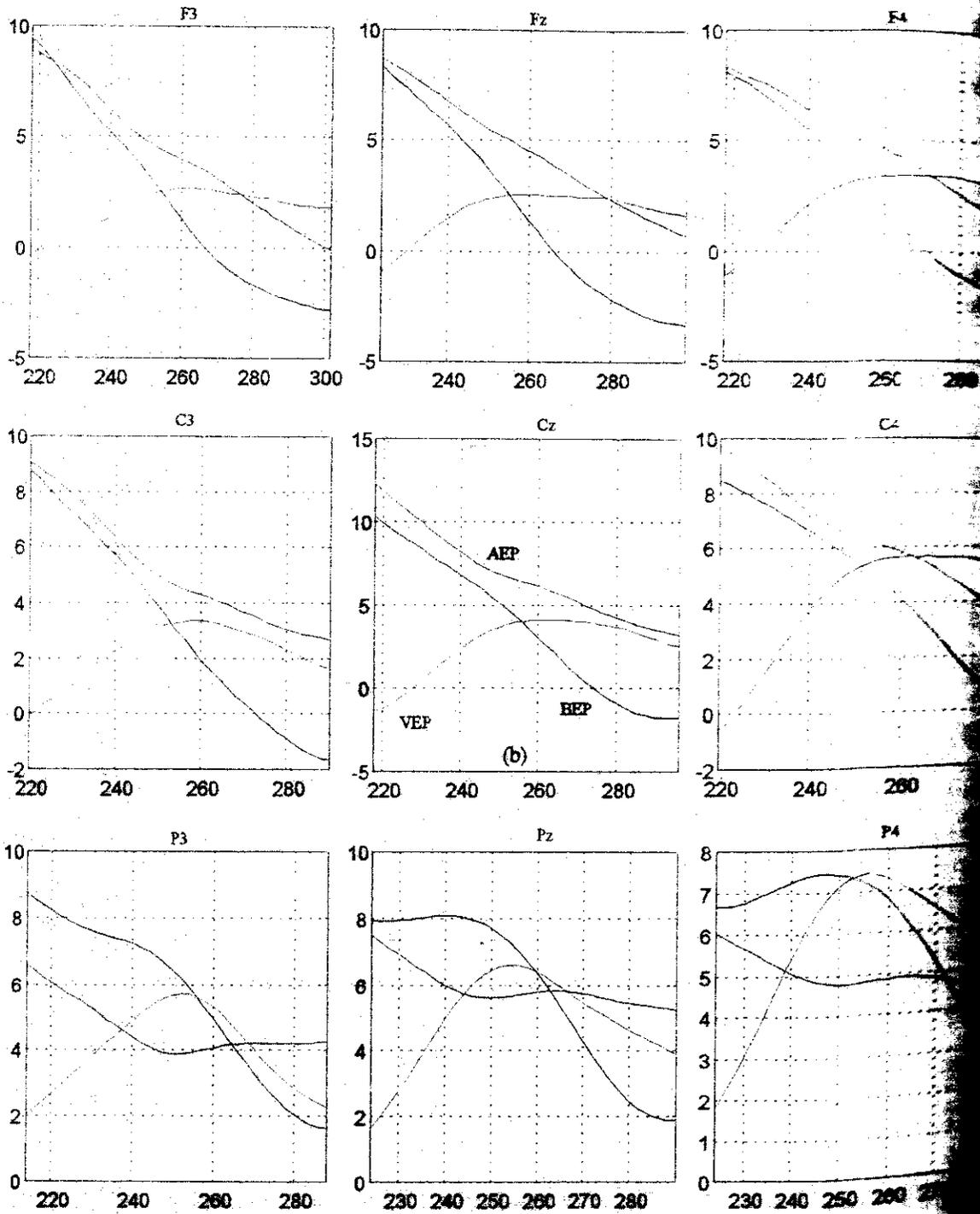


Figura VIII.2.13. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado binaural (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización

de actividades exógenas, es decir, la actividad generada por el modelo de sumación de energías es similar al potencial evocado bimodal.

La actividad de la segunda ventana de análisis incluye información del proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, figura VIII.2.13. Los resultados del modelo no-lineal, tabla VIII.2.3 y figuras VIII.2.14-16, revelan la importancia de las contribuciones lineales y no-lineales de las actividades unimodales en la síntesis del potencial evocado bimodal. Es importante notar que la contribucion no-lineal, como sucede en la

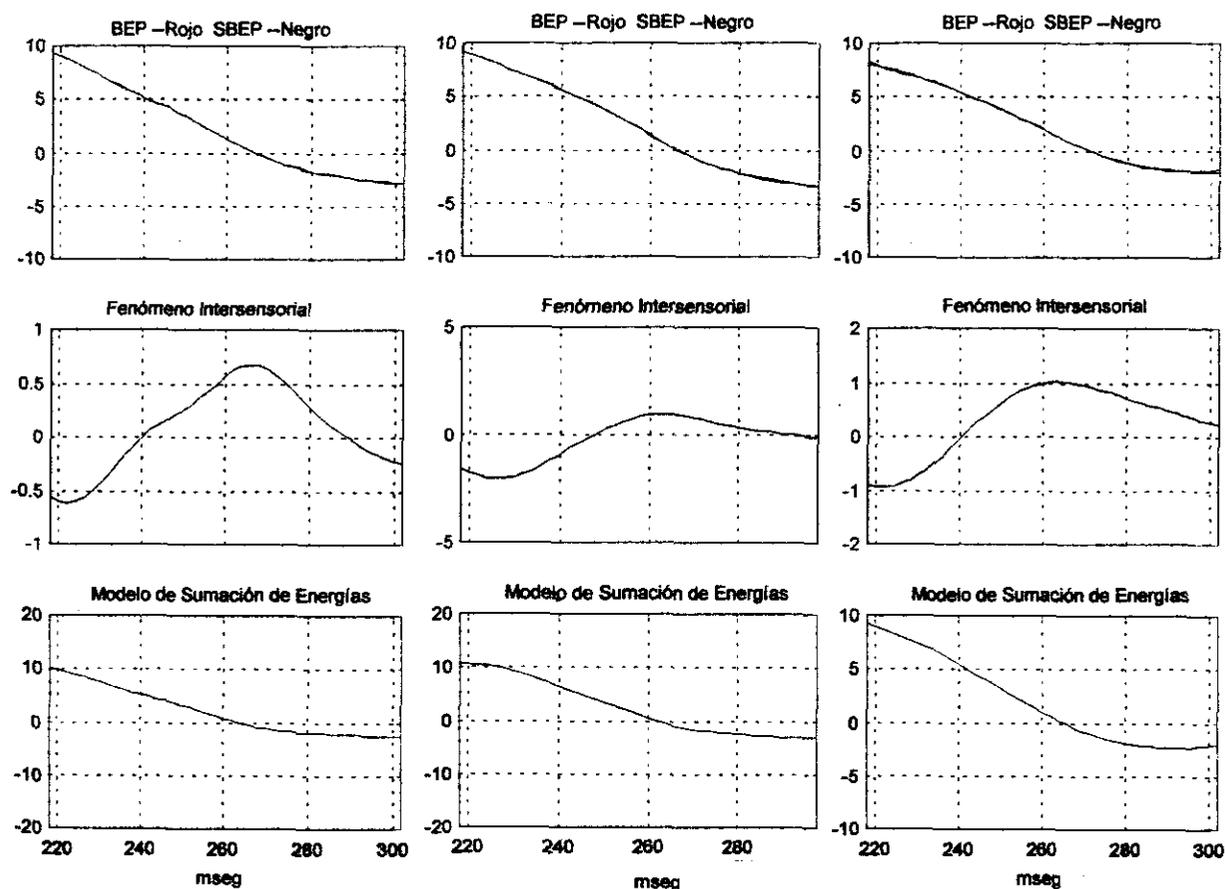


Figura VIII.2.14. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

primera ventana de análisis, se incrementa en la región parietal.

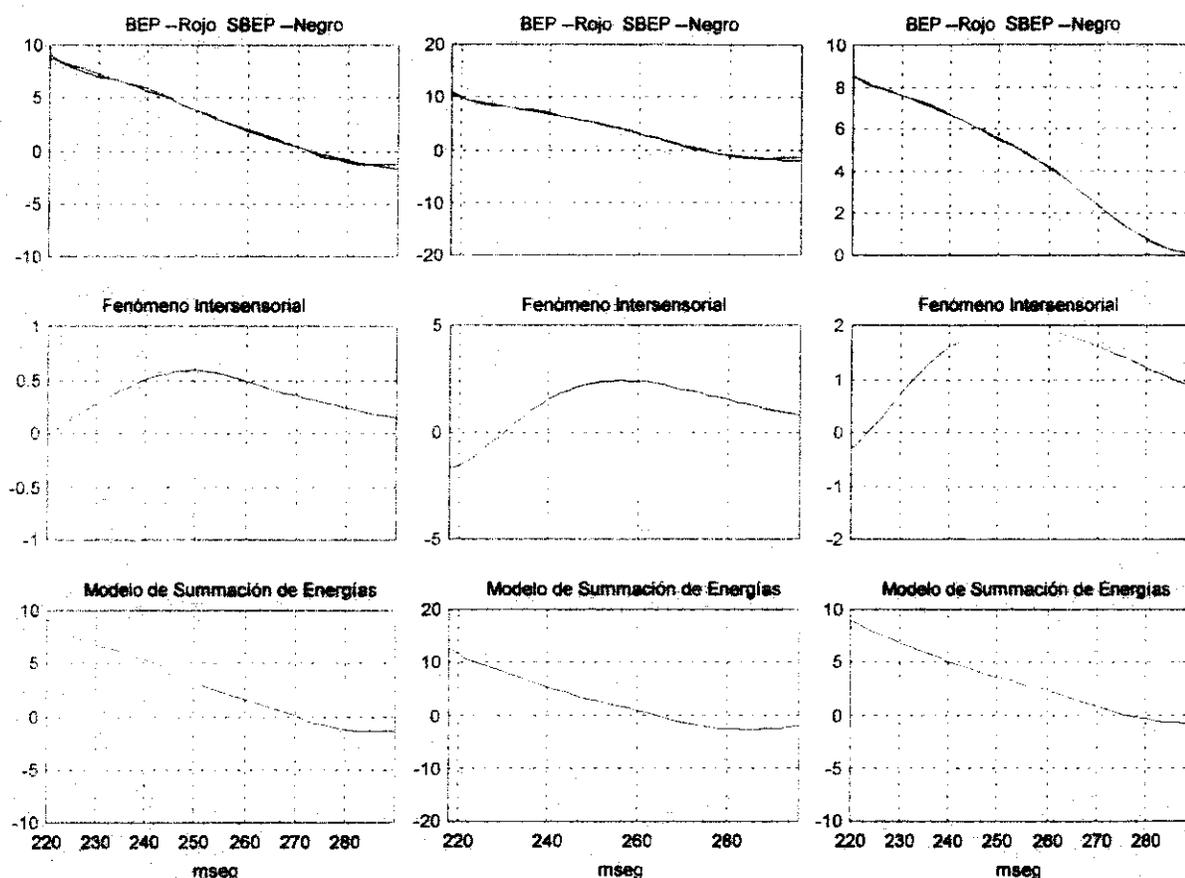


Figura VIII.2.15. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

Los resultados del primer experimento sugieren que para explicar la génesis del potencial evocado bimodal es necesario incluir tanto actividad lineal como actividad no-lineal de las vías sensoriales visual y auditiva. Se muestra que para la primera ventana de análisis, incluyendo procesos de detección de los estímulos visual y auditivo y el proceso de categorización del estímulo visual, y para la segunda ventana, incluyendo el proceso de categorización del estímulo auditivo y el

componente visual P300a, la actividad del modelo de sumación de energías y la actividad del fenómeno intersensorial son dependientes de la posición del electrodo. Además, se muestra que el potencial bimodal se genera principalmente mediante un modelo de sumación de energías. En el análisis de los siguientes experimentos es importante observar la dependencia del fenómeno intersensorial con la dificultad de la tarea asignada al sujeto.

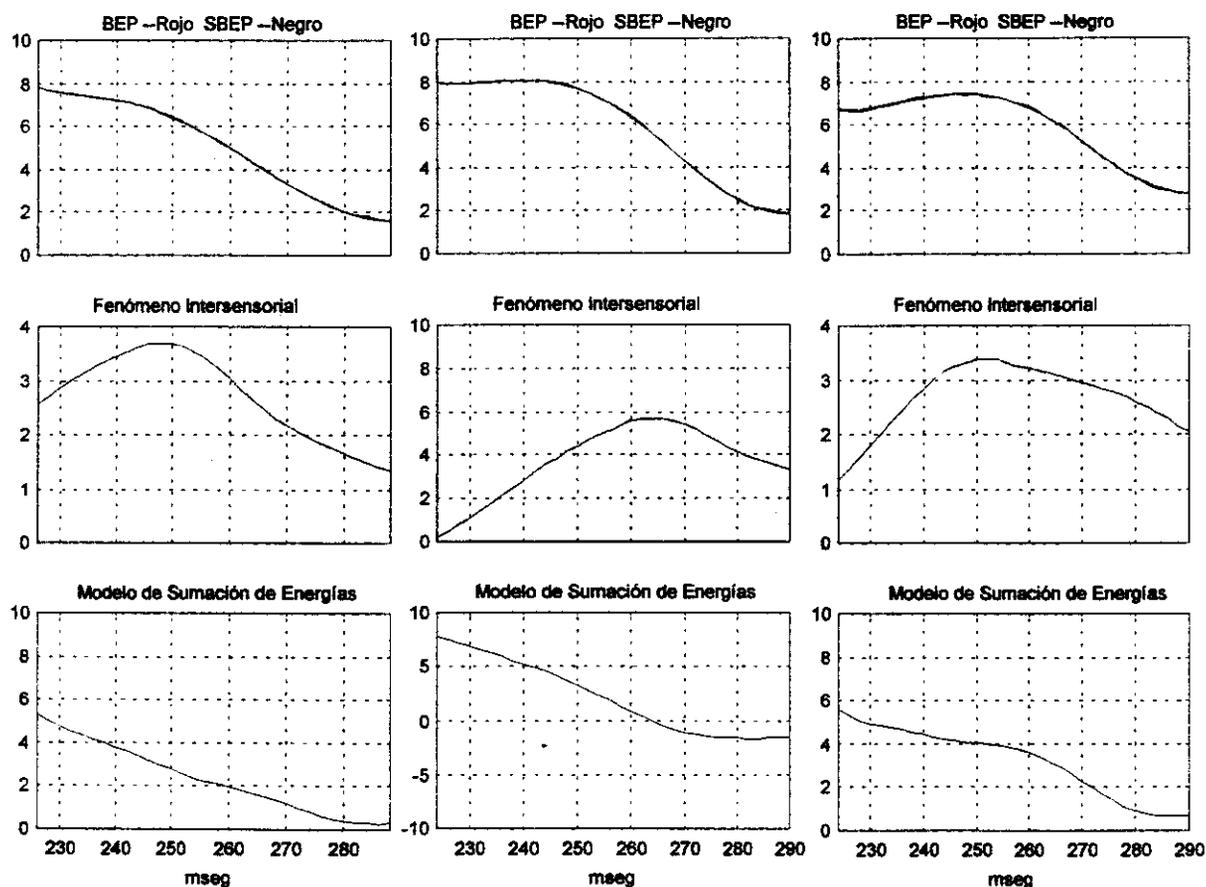


Figura VIII.2.16. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLE VIII.2.3

Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Segunda Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements
+0.642	$u_A(n-1)$	-0.878	$u_V(n-1)$	+0.450	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.410	$u_A(n-6)u_A(n-7)$
-0.621	$u_V(n-1)$	+0.174	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.299	$u_A(n-1)u_A(n-4)$	-0.310	$u_A(n-7)u_A(n-8)$
+0.575	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.253	$u_A(n-1)u_V(n-8)$	+0.075	$u_A(n-2)u_V(n-8)$	+0.026	$u_A(n-9)u_V(n-1)$
-0.722	$u_A(n-1)u_A(n-3)$	-0.669	$u_V(n-4)u_V(n-7)$	-0.227	$u_V(n-7)u_V(n-8)$	+0.969	$u_V(n-8)u_V(n-9)$
+0.230	$u_A(n-1)u_A(n-8)$	+1.179	$u_V(n-6)u_V(n-8)$			-1.155	$u_V(n-9)u_V(n-10)$
-0.106	$u_A(n-1)u_V(n-7)$	-0.971	$u_V(n-7)u_V(n-8)$				
+0.299	$u_A(n-1)u_V(n-8)$						
-0.082	$u_A(n-8)u_V(n-8)$						
-0.322	$u_V(n-7)u_V(n-8)$						

C4		P3		Pz		P4	
+0.192	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-1.094	$u_A(n-9)$	-1.368	$u_V(n-9)$	-1.504	$u_A(n-1)$
+0.058	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.276	$u_A(n-3)u_A(n-5)$	-0.120	$u_A(n-1)u_A(n-9)$	+0.802	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
-0.083	$u_A(n-3)u_A(n-7)$	-0.146	$u_A(n-3)u_V(n-6)$	-0.034	$u_A(n-1)u_V(n-5)$	-0.350	$u_A(n-1)u_A(n-8)$
+0.027	$u_V(n-2)u_V(n-7)$	+0.203	$u_A(n-6)u_V(n-1)$	+0.054	$u_A(n-2)u_A(n-8)$	+0.189	$u_A(n-7)u_V(n-1)$
-0.079	$u_V(n-7)u_V(n-8)$	+0.082	$u_A(n-9)u_V(n-1)$	+0.182	$u_A(n-4)u_A(n-6)$	-0.096	$u_A(n-8)u_V(n-1)$
		+0.083	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	+0.056	$u_A(n-4)u_V(n-7)$	+0.567	$u_A(n-5)u_V(n-1)$
				+0.593	$u_A(n-4)u_V(n-8)$	+0.071	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
				-0.475	$u_A(n-4)u_V(n-9)$	-0.078	$u_V(n-7)u_V(n-8)$
				+0.119	$u_V(n-2)u_V(n-3)$		

VIII.3. Experimento # 2

En el presente experimento se le solicita al sujeto ignorar el estímulo auditivo y responder tan pronto como le sea posible al estímulo visual. El objetivo del análisis no-lineal es evidenciar la influencia de un estímulo accesorio, el estímulo auditivo, en la génesis del potencial evocado bimodal. En la figura VIII.3.1(a) se muestran los potenciales unimodales y bimodal adquiridos en el electrodo Cz. Como puede observarse, en latencias tempranas la morfología del potencial evocado bimodal está más relacionada con la morfología del potencial evocado auditivo. La influencia de la tarea asignada al sujeto se observa claramente tanto en el potencial evocado auditivo como en el visual en donde un componente cognoscitivo se desarrolla después de los 300 milisegundos. El comportamiento cognoscitivo bimodal presenta una amplitud mayor en comparación con la actividad correspondiente del primer experimento. Sin embargo, es importante notar que la amplitud cognoscitiva bimodal es

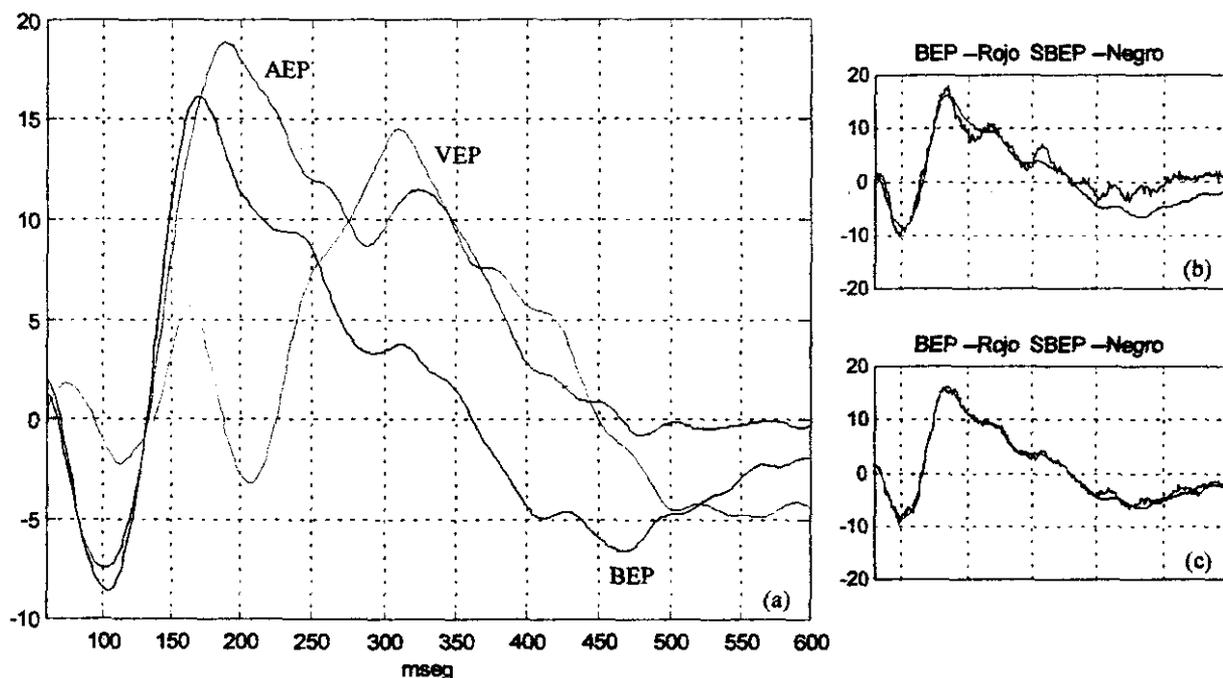


Figura VIII.3.1. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

menor en comparación con la actividad cognoscitiva auditiva o visual, sugiriendo que la interacción entre la categorización del estímulo auditivo y el proceso después de la categorización del estímulo visual influye en forma importante en la génesis del proceso de decisión bimodal.

Como se muestra en la figura VIII.3.1(b), el modelo lineal del potencial bimodal no es suficiente para explicar los procesos subyacentes en el presente paradigma. En contraste, en la figura VIII.3.1(c) se presenta el modelo no-lineal del potencial evocado bimodal, como puede observarse existe un mejor ajuste entre la señal adquirida y la señal sintetizada. Como se mencionó en el experimento # 1, con el propósito de incluir información específica que se genera en ciertas latencias, el análisis no-lineal se efectúa segmentando las actividades unimodales y bimodal.

VIII.3.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz

El modelo no-lineal del potencial evocado bimodal adquirido es primeramente aplicado al electrodo Cz. La primera ventana de análisis, de los 60 a los 220 milisegundos, es mostrada en la figura VIII.3.2(a). Como puede observarse de la figura VIII.3.2(b)-(d), la ventana de análisis inicial no incluye fenómenos de interacción hasta los 140 milisegundos y en consecuencia, el modelo de sumación de energías es suficiente para explicar la morfología del componente bimodal N100. Además, la figura VIII.3.2(c) revela que la información auditiva y visual se relacionan en forma no-lineal para poder sintetizar el componente bimodal P200. Como se esperaba, la contribución del potencial evocado auditivo es mayor que la contribución del potencial evocado visual, lo anterior se refleja en los coeficientes reportados en la Tabla VIII.3.1.

La segunda ventana de análisis inicia en los 222 milisegundos y finaliza en los 288

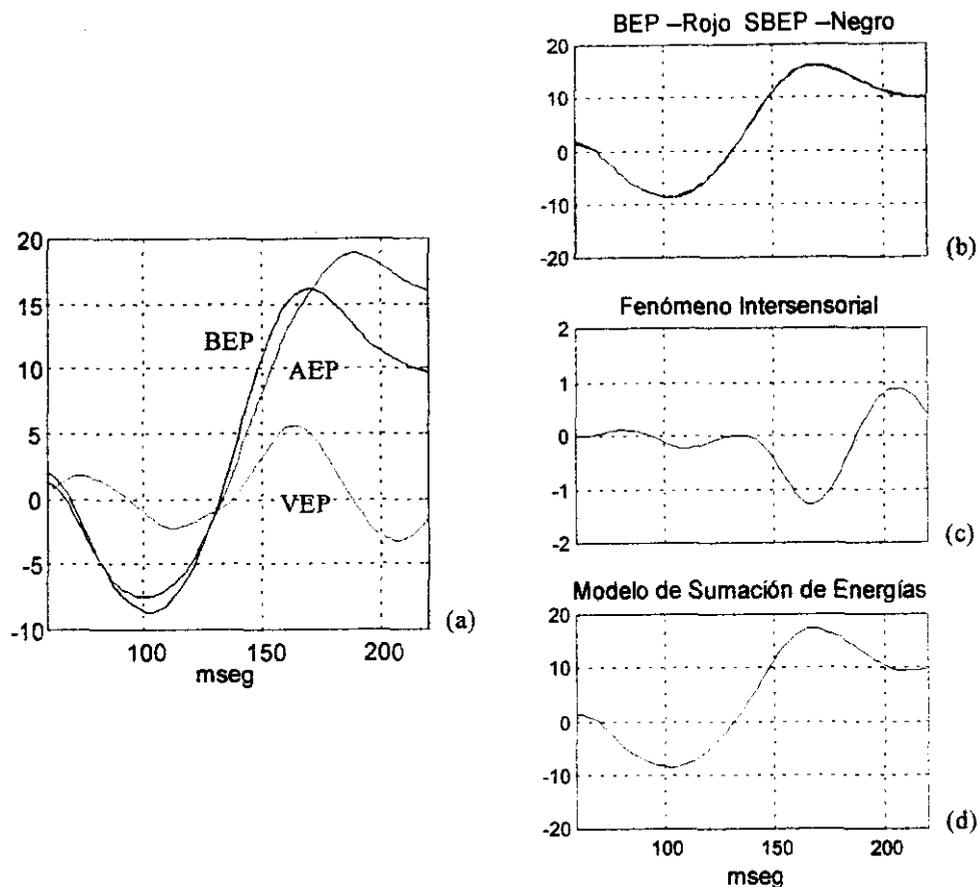


Figura VIII.3.2. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en el electrodo Cz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

milisegundos, figura VIII.3.3(a), involucrando un incremento en el proceso cognoscitivo visual posterior al proceso de categorización visual, un decremento de la actividad eléctrica auditiva y el proceso de categorización del estímulo bimodal. Los resultados presentados en la figuras VIII.3.3.(b)-(d) indican que se requiere involucrar tanto contribuciones lineales y no-lineales en la síntesis del potencial evocado bimodal. En el caso del potencial evocado visual, después del componente N200, es evidente la generación de las ondas P300a y P300b. En el caso bimodal, parece ser que las ondas

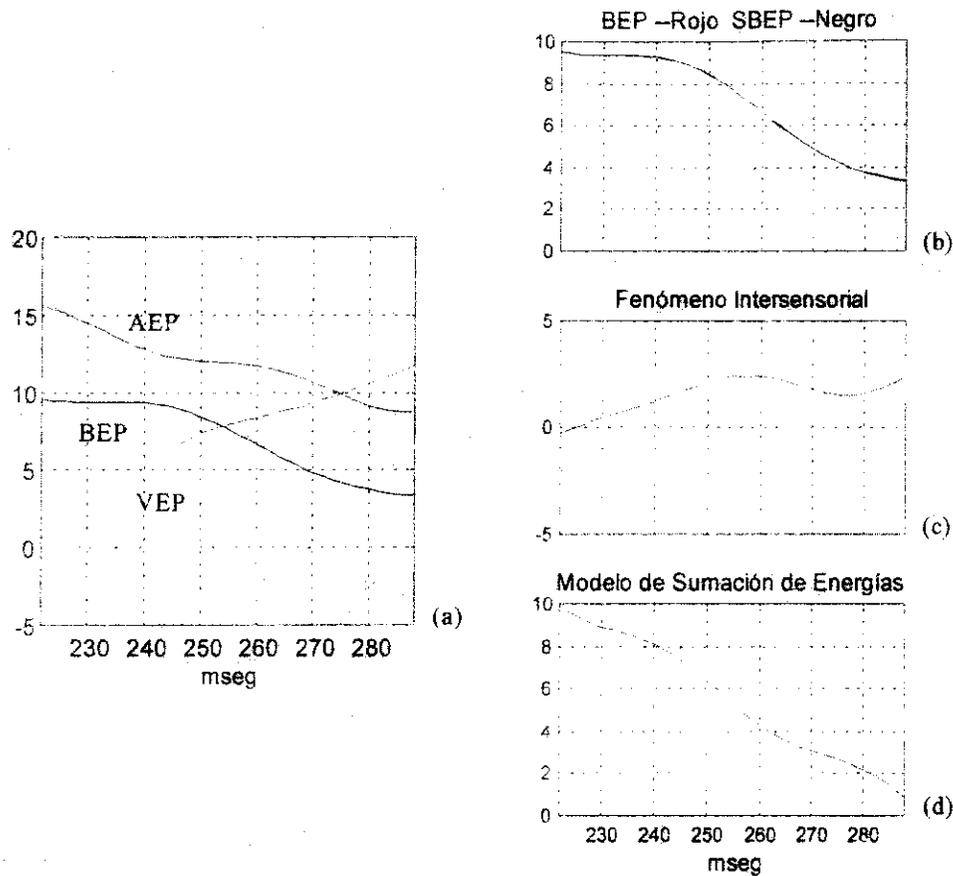


Figura VIII.3.3. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en el electrodo Cz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y simulado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

P300a y P300b visuales son modificadas por el proceso de categorización del estímulo auditivo. Una posible explicación puede asociarse con la no correlación de los estímulos auditivo y visual y el hecho de que el proceso de categorización visual inicia antes que el proceso auditivo correspondiente. Es posible que el estímulo auditivo realice el papel de un estímulo accesorio en el sentido de contribuir energía al proceso de categorización del estímulo bimodal. En otras palabras, en la presentación del estímulo bimodal la información auditiva facilita los procesos de categorización y decisión. Lo

anterior podría explicar el hecho de que el tiempo de reacción bimodal es más rápido que el tiempo de reacción para la presentación visual. Los coeficientes del modelo no-lineal, para esta segunda ventana de análisis, se reportan en la Tabla VIII.3.1.

La tercera ventana de análisis, definida a partir de los 290 milisegundos hasta los 344 milisegundos y mostrada en la figura VIII.3.4(a), incluye los componentes cognoscitivos P300 unimodales y bimodal. Los resultados del modelo no-lineal señalan que el componente P300 bimodal

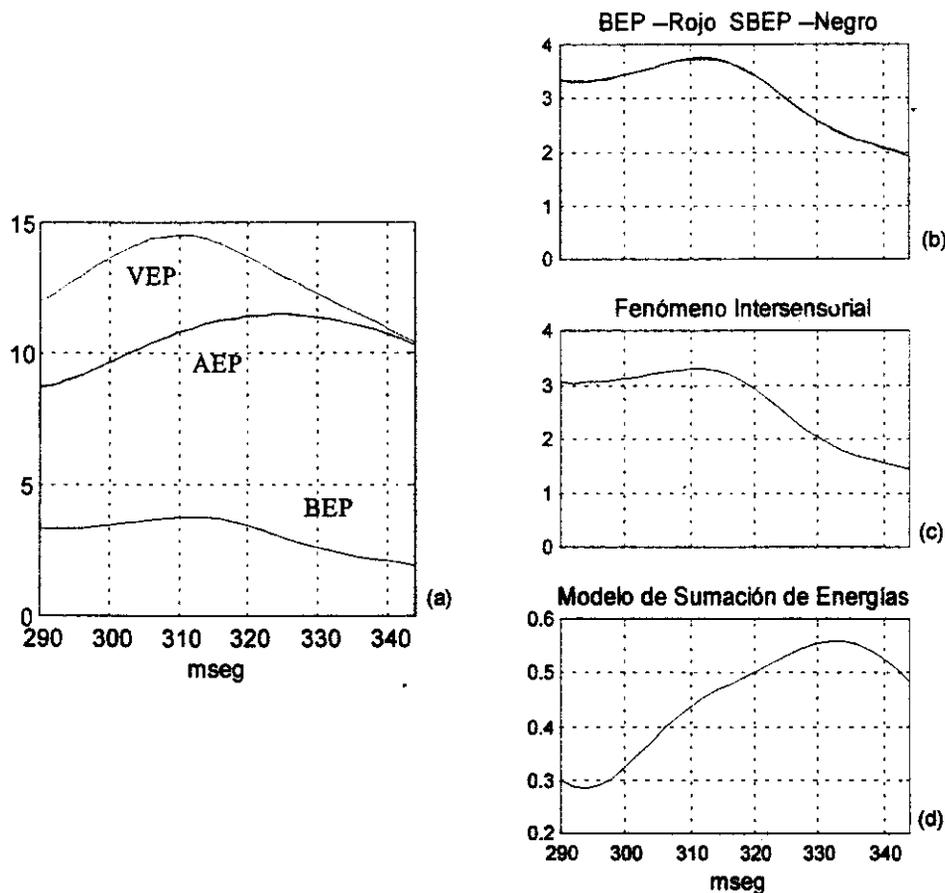


Figura VIII.3.4. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en el electrodo Cz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

puede sintetizarse utilizando una contribución intersensorial importante, figuras VIII.3.4(b)-(d). Parece ser que la interacción entre la información visual y auditiva de la segunda ventana influye en forma importante en la generación del componente P300 de la tercera ventana. En otras palabras, es posible que la energía del estímulo auditivo accesorio interactúe con los procesos visuales, facilitando el proceso de decisión, respuesta y cierre. La longitud de la tercera ventana puede ser mayor, sin embargo, es posible que la información involucrada este asociada con algunos procesos terminales haciendo difícil la tarea de modelado debido a que no es posible ajustar todos los pequeños cambios del potencial evocado bimodal.

Los resultados del modelo no-lineal, para el electrodo Cz, muestran que los términos no-lineales se "comportan" en forma diferente a los obtenidos en el primer experimento. Lo anterior sugiere que las condiciones experimentales afectan la relación existente entre las vías sensoriales.

TABLA VIII.3.1

Coefficientes del Modelo No-Lineal.

Ventana # 1		Ventana # 2		Ventana # 3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+1.186	$u_A(n-1)$	+0.194	$u_A(n-1)*u_V(n-1)$	-0.041	$u_V(n-10)$
-0.273	$u_A(n-8)$	-0.167	$u_A(n-3)*u_V(n-1)$	+0.010	$u_A(n-2)*u_A(n-3)$
+0.577	$u_V(n-1)$	+0.093	$u_A(n-10)*u_A(n-11)$	+0.013	$u_A(n-7)*u_V(n-2)$
-0.016	$u_A(n-1)*u_V(n-1)$	-0.059	$u_A(n-11)*u_A(n-12)$	+0.015	$u_A(n-9)*u_V(n-3)$
+0.007	$u_A(n-2)*u_A(n-3)$	-0.034	$u_V(n-11)*u_V(n-12)$	-0.035	$u_A(n-10)*u_V(n-11)$
-0.006	$u_A(n-7)*u_A(n-8)$			+0.016	$u_A(n-11)*u_V(n-1)$
+0.034	$u_V(n-1)*u_V(n-2)$			+0.010	$u_A(n-11)*u_V(n-5)$
				+0.006	$u_V(n-1)*u_V(n-2)$
				-0.007	$u_V(n-2)*u_V(n-3)$

VIII.3.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

Para obtener una idea general del fenómeno que se desarrolla en el presente paradigma, en las figuras VIII.3.5-6 se presenta la distribución espacial de las actividades unimodales y bimodal utilizando la representación horizontal y vertical. En la representación horizontal, figura VIII.3.5, puede observarse una actividad auditiva exógena importante localizada en la región fronto-central, actividades relacionadas con procesos de categorización y procesos de decisión. En contraste, la

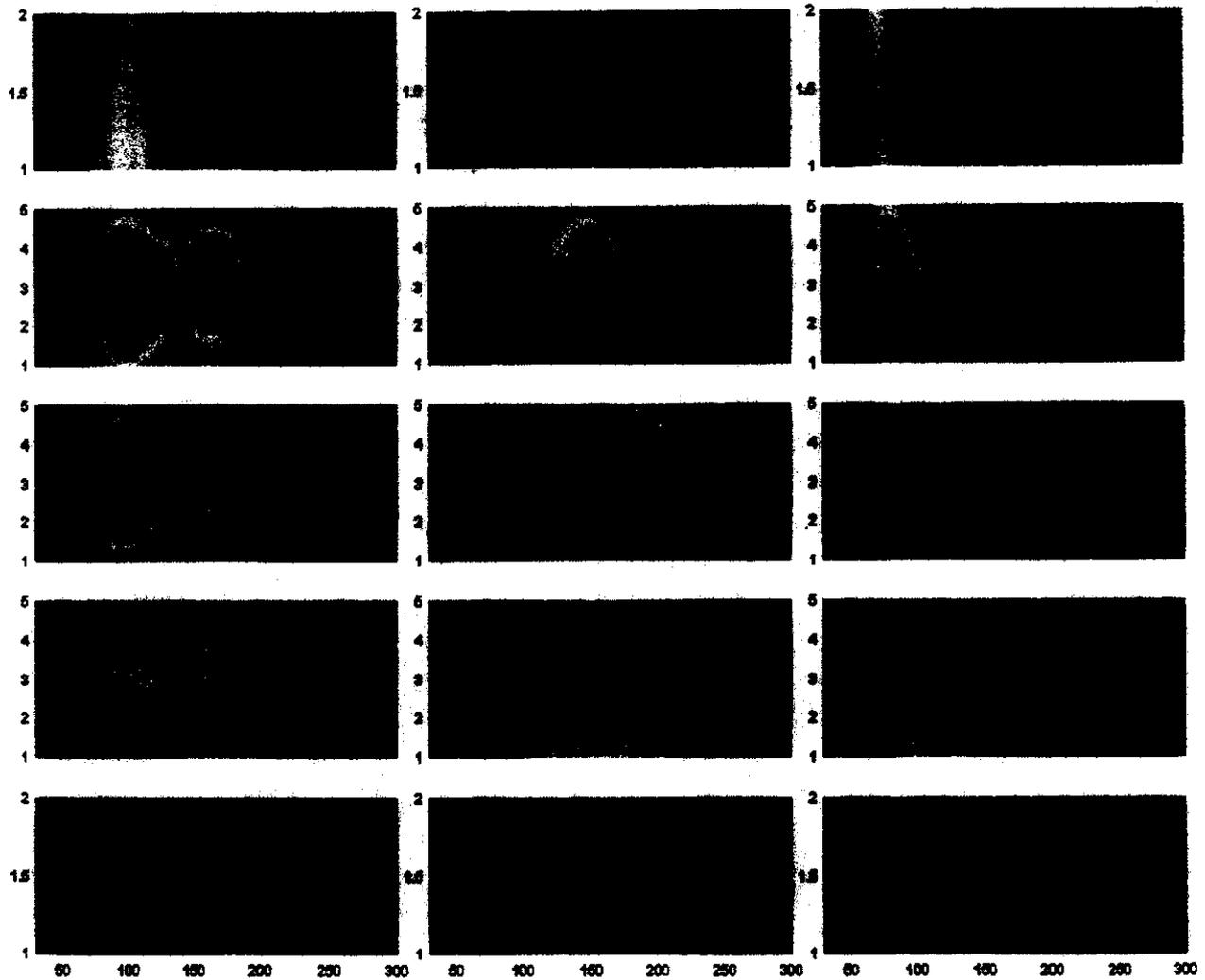


Figura VIII.3.5. Representación horizontal de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos occipitales del sistema 10-20.

actividad eléctrica visual muestra una amplitud mayor en la región central y parietal mientras que la actividad bimodal se distribuye hacia las regiones frontal y occipital, el proceso de categorización de los estímulos tiene su máxima amplitud en la región parietal. En la representación vertical, figura VIII.3.6, los componentes auditivos N100 y P200 parecen tener simetría en contraste con la actividad cognoscitiva que es más intensa en la región parietal del hemisferio derecho. La representación de la actividad visual muestra una simetría de los componentes exógenos, una actividad N200 localizada

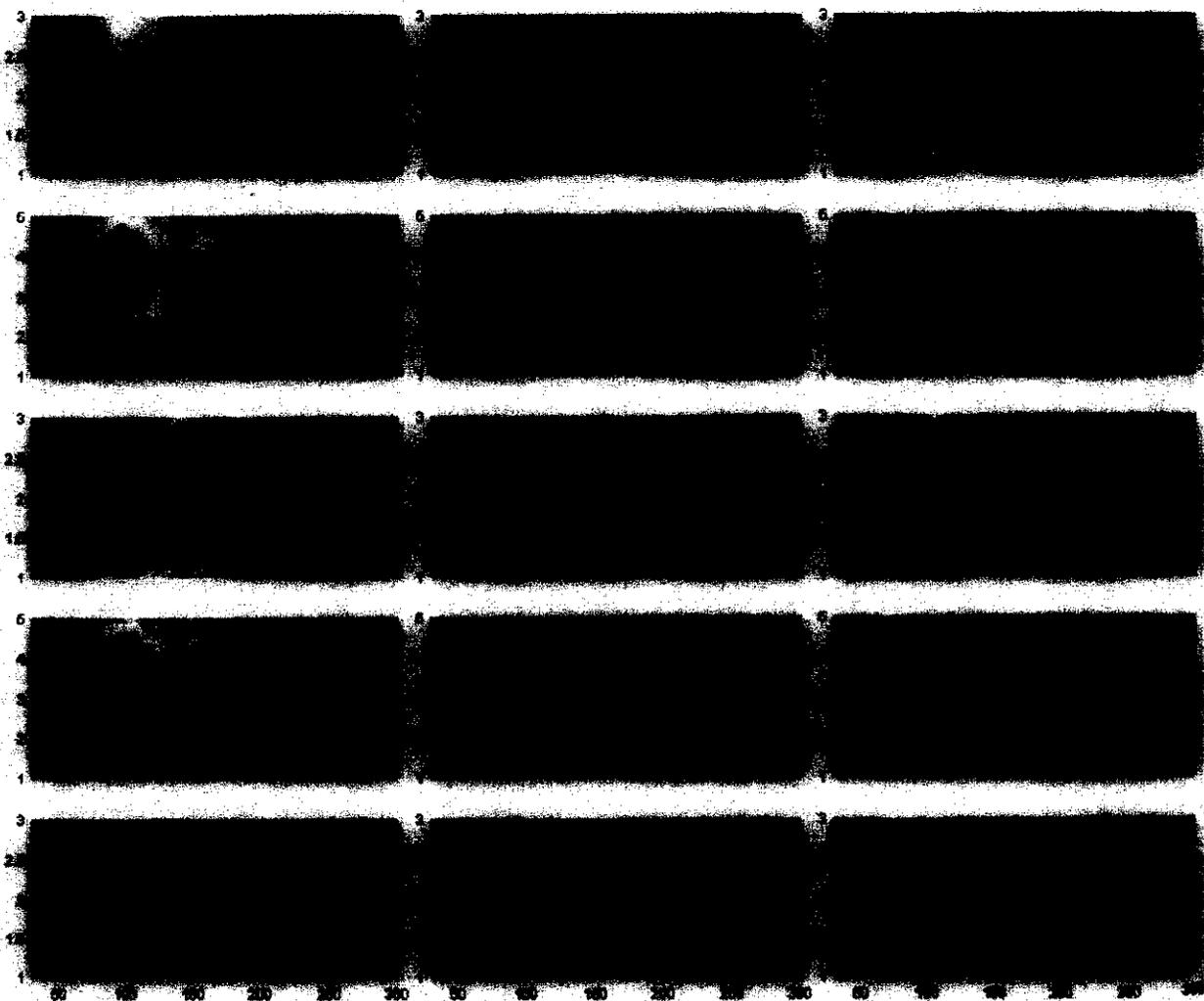


Figura VIII.3.6. Representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos F8, T4 y T6 del sistema 10-20.

en el vertex y una actividad relacionada con los procesos de categorización del estímulo y con el proceso de decisión, de mayor amplitud en la región vertex-parietal con una lateralización hacia el hemisferio derecho. Los componentes exógenos bimodales parecen tener una distribución fronto-central mientras que el pico positivo principal y los procesos de categorización están lateralizados hacia el hemisferio derecho. Es posible que la intensidad del proceso de categorización del estímulo visual influya en forma importante en la generación de la actividad bimodal. En la figura VIII.3.7 se muestra la distribución espacial del potencial evocado bimodal mediante mapas topográficos con una resolución de 15 milisegundos. Los componentes N100 y P200 se observan claramente en los mapas antes citados. En la figura VIII.3.8, el fenómeno "switch" explicado en el primer experimento se presenta en el electrodo P3.

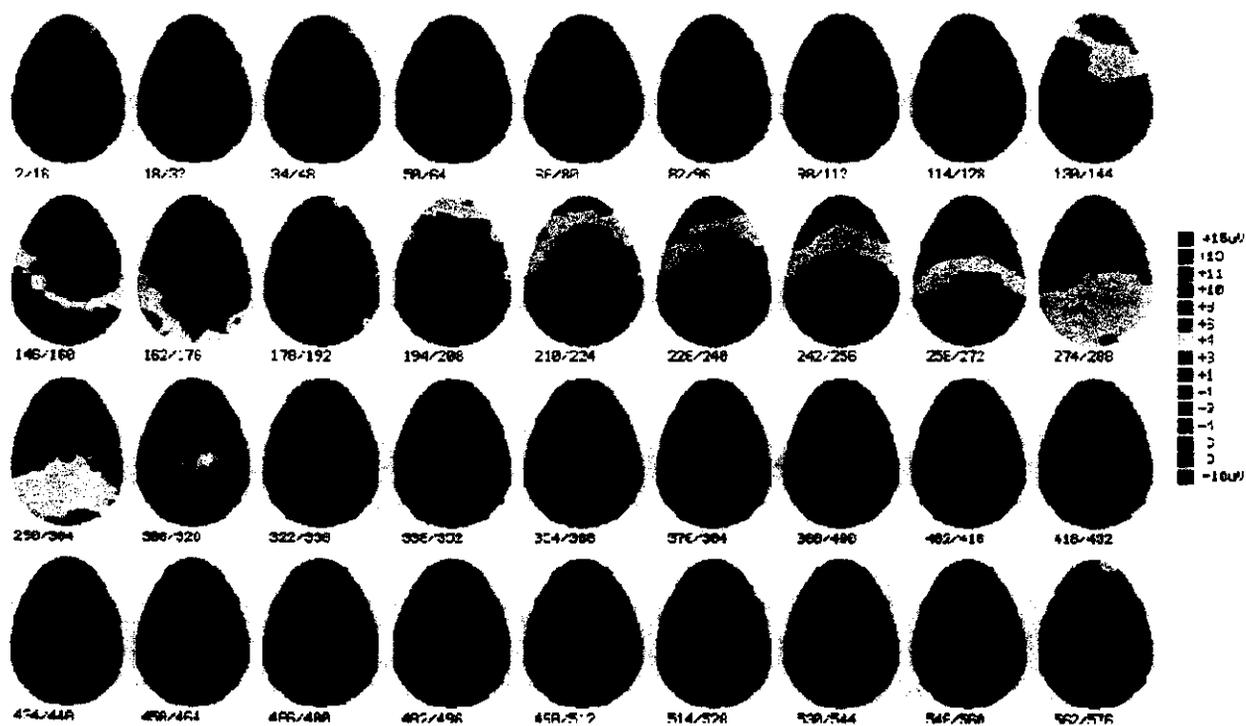


Figura VIII.3.7. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

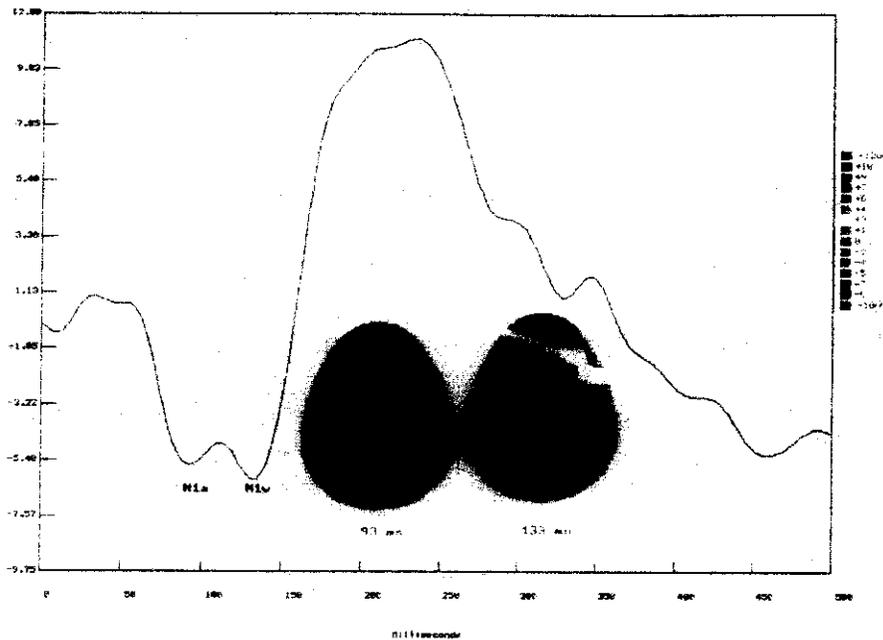


Figura VIII.3.8. Distribución espacial del componente bimodal N100.

VIII.3.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal

Los resultados espaciales del modelo no-lineal, para la primera ventana de análisis, se resumen en la Tabla VIII.3.2. En los electrodos frontales, figura VIII.3.9(a), la morfología del componente bimodal N100 sigue la morfología del componente auditivo N100, situación que se refleja por la ausencia y pequeña contribución no-lineal obtenida por el modelo NARX, figura VIII.3.9(c). Sin embargo, el componente bimodal P200 diverge tanto de la actividad visual como de la auditiva, divergencia que es mayor en el electrodo F4, figura VIII.3.9(a). Para este componente, el modelo no-lineal indica un incremento del fenómeno intersensorial en el electrodo F4. En la región del vertex, en forma similar a la región frontal, el componente bimodal N100 sigue al componente auditivo N100

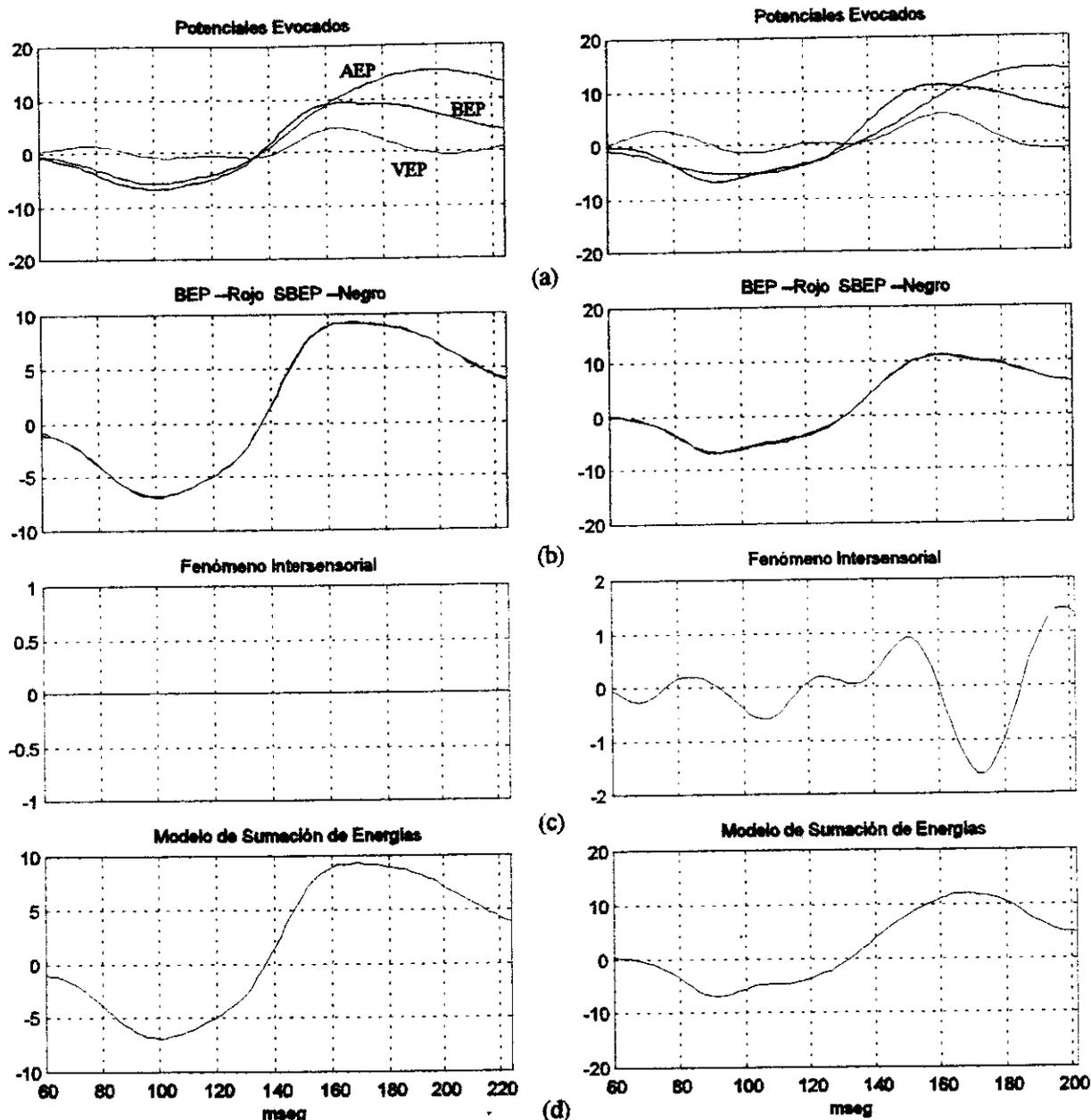


Figura VIII.3.9. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos F3 y F4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

mientras que para el componente bimodal P200 existe un incremento del comportamiento no-lineal en los electrodos C3 y C4, figura VIII.3.10(c). En la figura VIII.3.11(a) se muestra el fenómeno de

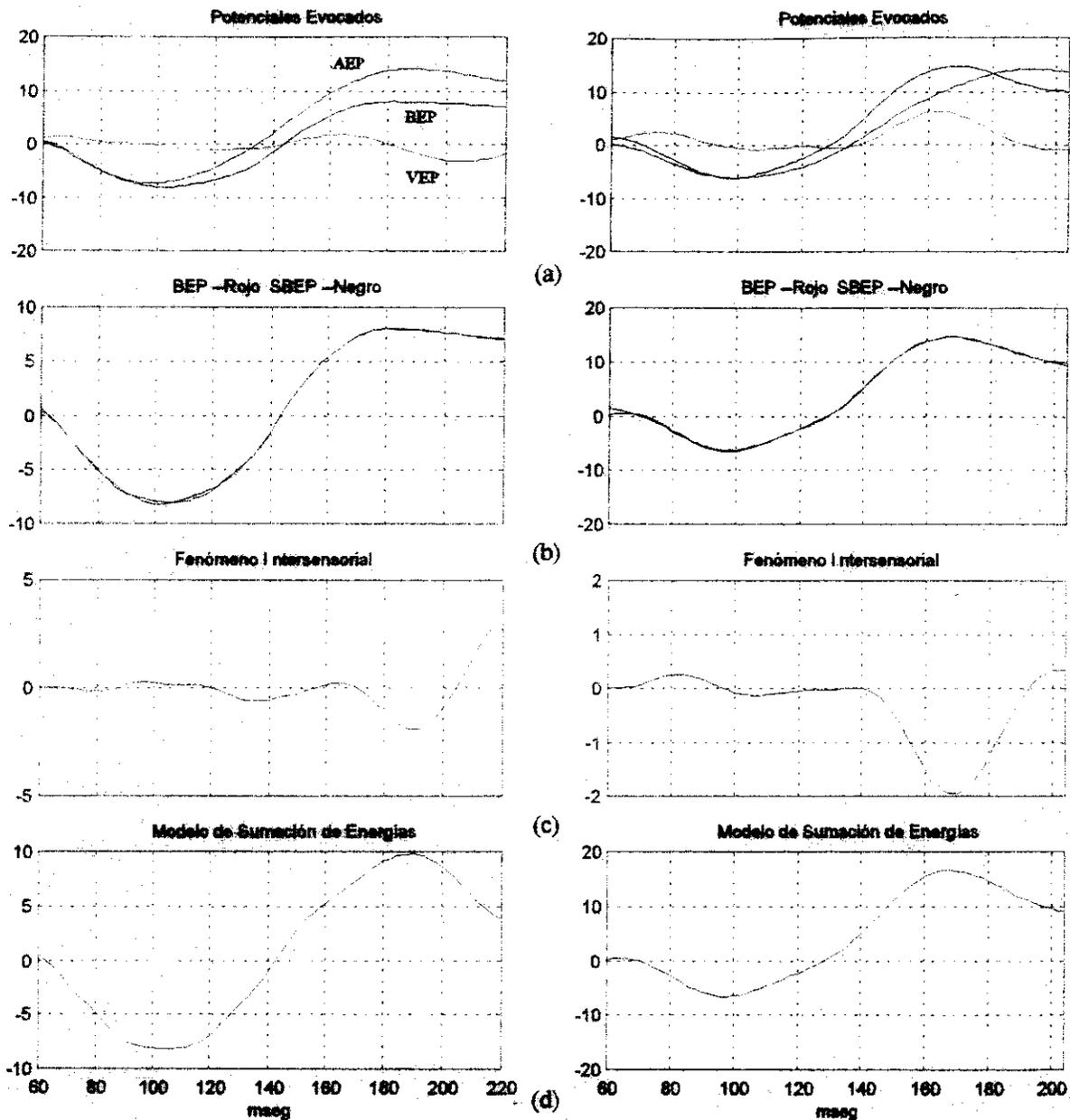


Figura VIII.3.10. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos C3 y C4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

“switch”, localizado en forma más evidente en la región parietal. Como consecuencia del fenómeno de “switch” existen contribuciones no-lineales en la generación del componente bimodal N100, es

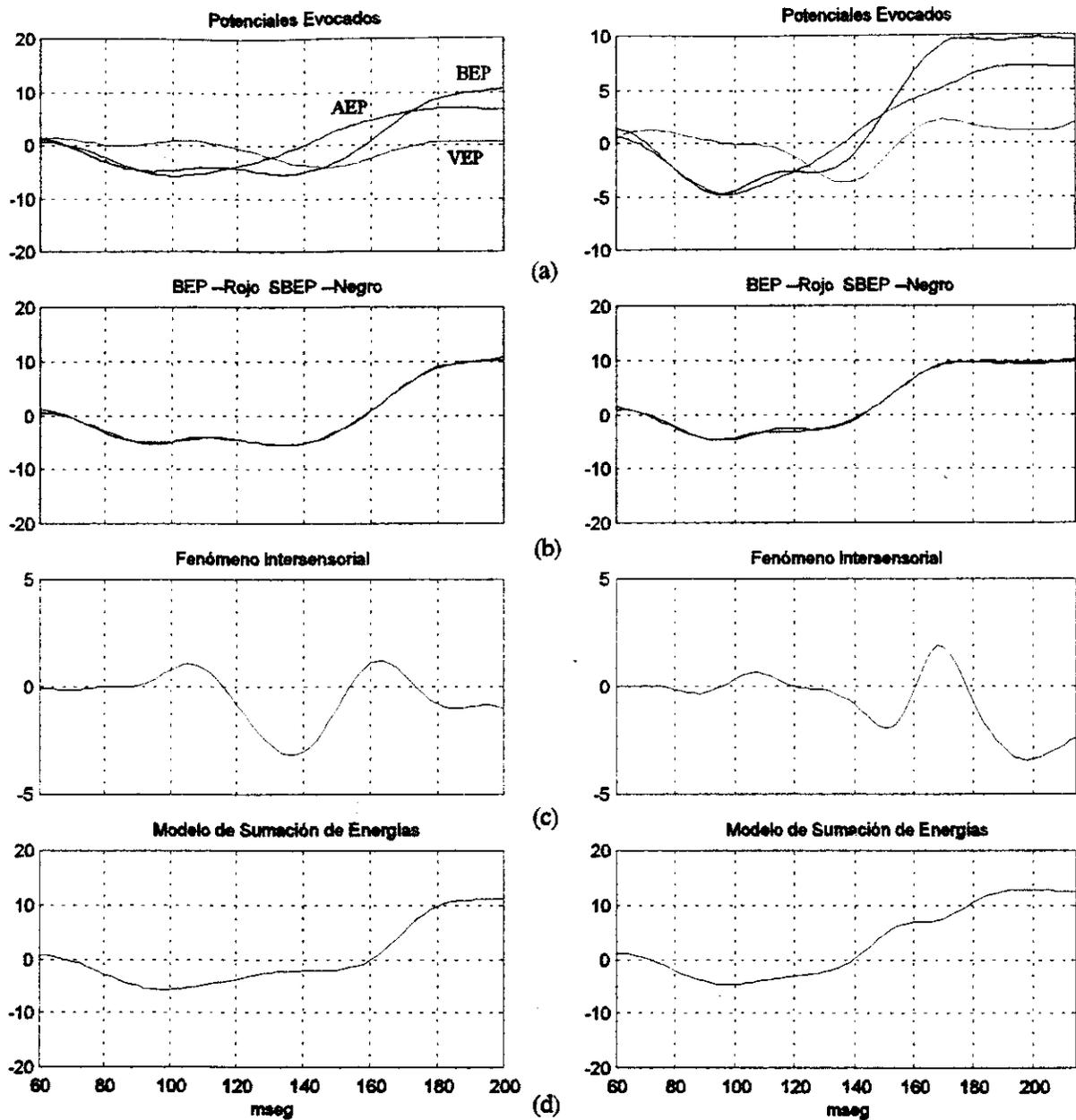


Figura VIII.3.11. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos P3 y P4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

posible que las no-linealidades asociadas a los componentes bimodales N100 y P200 se combinen y la información de no-linealidad mostrada en la figura VIII.3.11(c) no corresponda a uno de los componentes en particular. La figura VIII.3.12 confirma que el comportamiento no-lineal es más

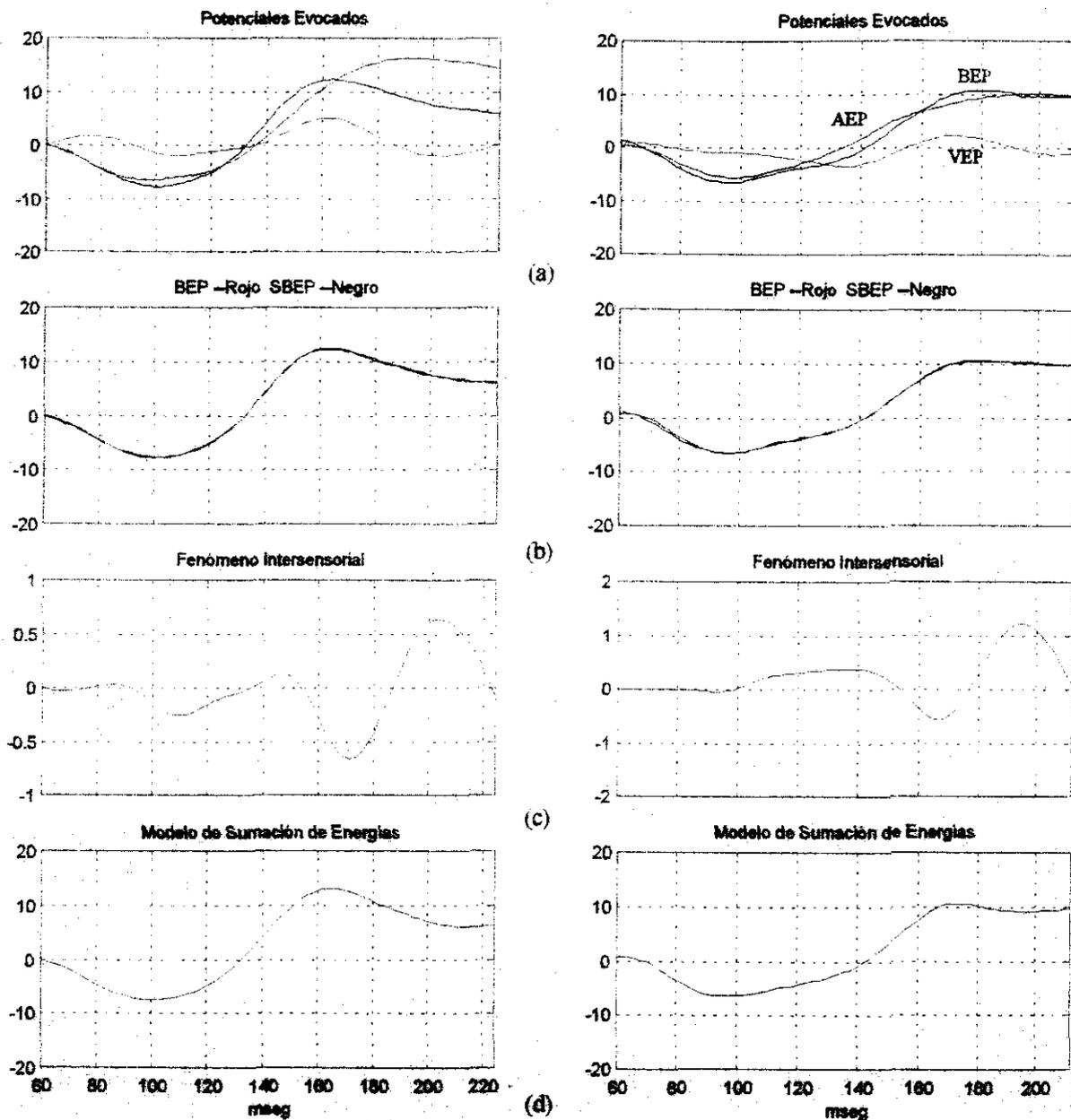


Figura VIII.3.12. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos Fz y Pz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

intenso en la región parietal que en la región frontal.

TABLE VIII.3.2

Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+1.183	$u_A(n-1)$	+1.167	$u_A(n-1)$	+1.058	$u_A(n-1)$	+1.045	$u_A(n-4)$
-0.173	$u_A(n-10)$	-0.210	$u_A(n-10)$	-0.808	$u_V(n-9)$	-0.289	$u_V(n-6)$
+0.010	$u_V(n-1)$	+0.201	$u_V(n-1)$	-0.160	$u_A(n-1)u_A(n-14)$	+0.013	$u_A(n-1)u_V(n-6)$
-0.410	$u_V(n-5)$	-0.124	$u_A(n-1)u_A(n-10)$	+0.293	$u_A(n-2)u_A(n-13)$	-0.006	$u_A(n-2)u_A(n-4)$
+0.264	$u_A(n-1)u_A(n-10)$	+0.090	$u_A(n-4)u_A(n-8)$	-0.844	$u_A(n-5)u_A(n-13)$	-0.096	$u_A(n-12)u_V(n-12)$
-0.303	$u_A(n-2)u_A(n-10)$	-0.021	$u_A(n-10)u_V(n-1)$	+0.614	$u_A(n-9)u_A(n-10)$	-0.204	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
				-0.110	$u_A(n-13)u_V(n-1)$	+0.936	$u_V(n-1)u_V(n-8)$
				-1.357	$u_V(n-2)u_V(n-14)$	-1.260	$u_V(n-4)u_V(n-5)$
				+1.118	$u_V(n-3)u_V(n-13)$	+0.125	$u_V(n-4)u_V(n-12)$
						-0.545	$u_V(n-11)u_V(n-12)$

C4		P3		Pz		P4	
+1.259	$u_A(n-1)$	+0.934	$u_A(n-1)$	+1.052	$u_A(n-1)$	+1.248	$u_A(n-2)$
-0.515	$u_A(n-12)$	+0.159	$u_A(n-7)$	+0.327	$u_V(n-1)$	+0.069	$u_V(n-1)$
+0.773	$u_V(n-1)$	+0.251	$u_A(n-1)u_A(n-12)$	+0.279	$u_V(n-2)$	+0.189	$u_V(n-2)$
+0.113	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.159	$u_A(n-5)u_A(n-10)$	-0.265	$u_V(n-11)$	+0.015	$u_A(n-1)u_V(n-1)$
-0.157	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	-0.266	$u_A(n-8)u_V(n-1)$	+0.004	$u_A(n-7)u_A(n-11)$	-0.718	$u_A(n-1)u_V(n-12)$
+0.051	$u_A(n-11)u_V(n-1)$	-0.245	$u_V(n-7)u_V(n-8)$	+0.062	$u_A(n-11)u_V(n-12)$	+1.031	$u_A(n-3)u_V(n-12)$
+0.023	$u_V(n-1)u_V(n-10)$			-0.181	$u_V(n-7)u_V(n-10)$	+0.061	$u_A(n-4)u_A(n-5)$
						-0.628	$u_A(n-10)u_V(n-12)$
						+0.194	$u_V(n-6)u_V(n-12)$

En la figura VIII.3.13 se muestran las actividades de todos los electrodos para la segunda ventana de análisis. El modelo no-lineal de la interacción entre los procesos de categorización auditiva y un proceso visual posterior al proceso de categorización del estímulo visual, revela que en la región

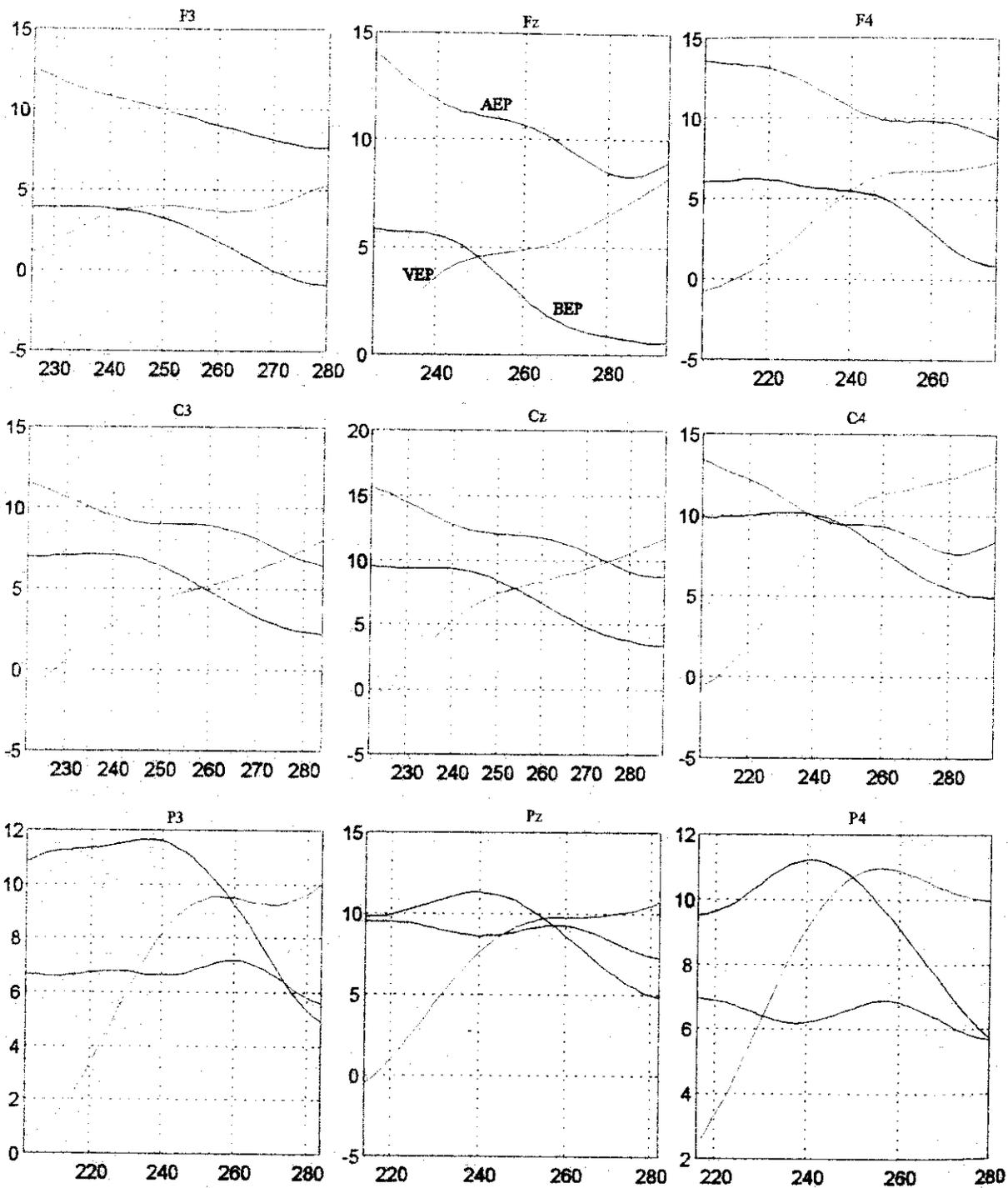


Figura VIII.3.13. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

frontal el potencial bimodal adquirido es principalmente generado por el modelo de sumación de

energías, figura VIII.3.14. En la región del vertex, la actividad no-lineal se incrementa con respecto a la parte frontal y presenta una lateralización derecha, figura VIII.3.15. En la figura VIII.3.16 se muestra que los efectos no-lineales se generan principalmente en la región parietal. La lateralización reportada por el modelo concuerda con la lateralización derecha reportada para la actividad visual y bimodal, figura VIII.3.3. Los coeficientes del modelo se reportan en la Tabla VIII.3.3. Los resultados obtenidos e incluidos en la Tabla apoyan la idea de que la interacción del proceso de categorización del estímulo auditivo con el proceso de post-categorización visual resulta en un

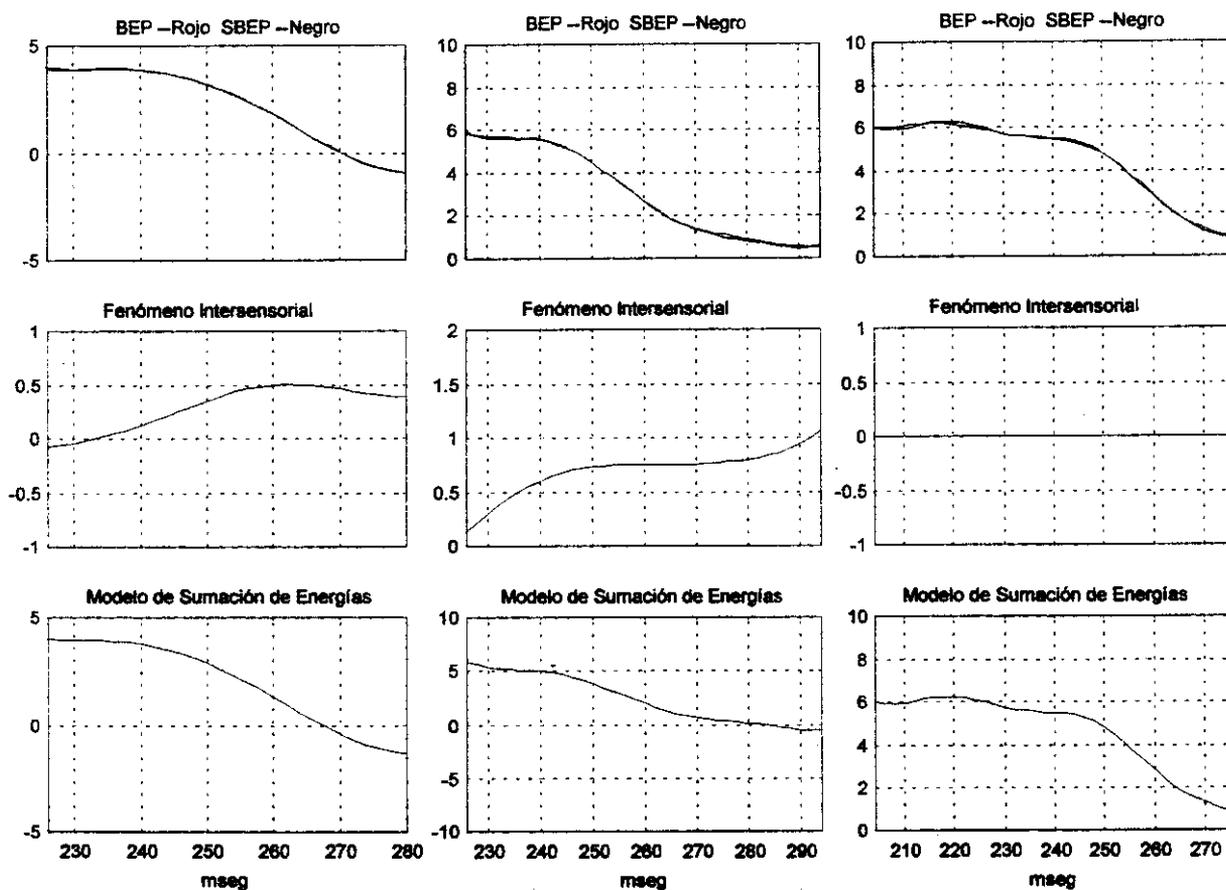


Figura VIII.3.14. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

proceso de facilitación. Las actividades unimodales y bimodal incluidas en la figura VIII.3.13 muestran que la actividad bimodal se decremента a partir de la latencia en donde el componente P300a visual y el proceso de categorización del estímulo auditivo interactúan.

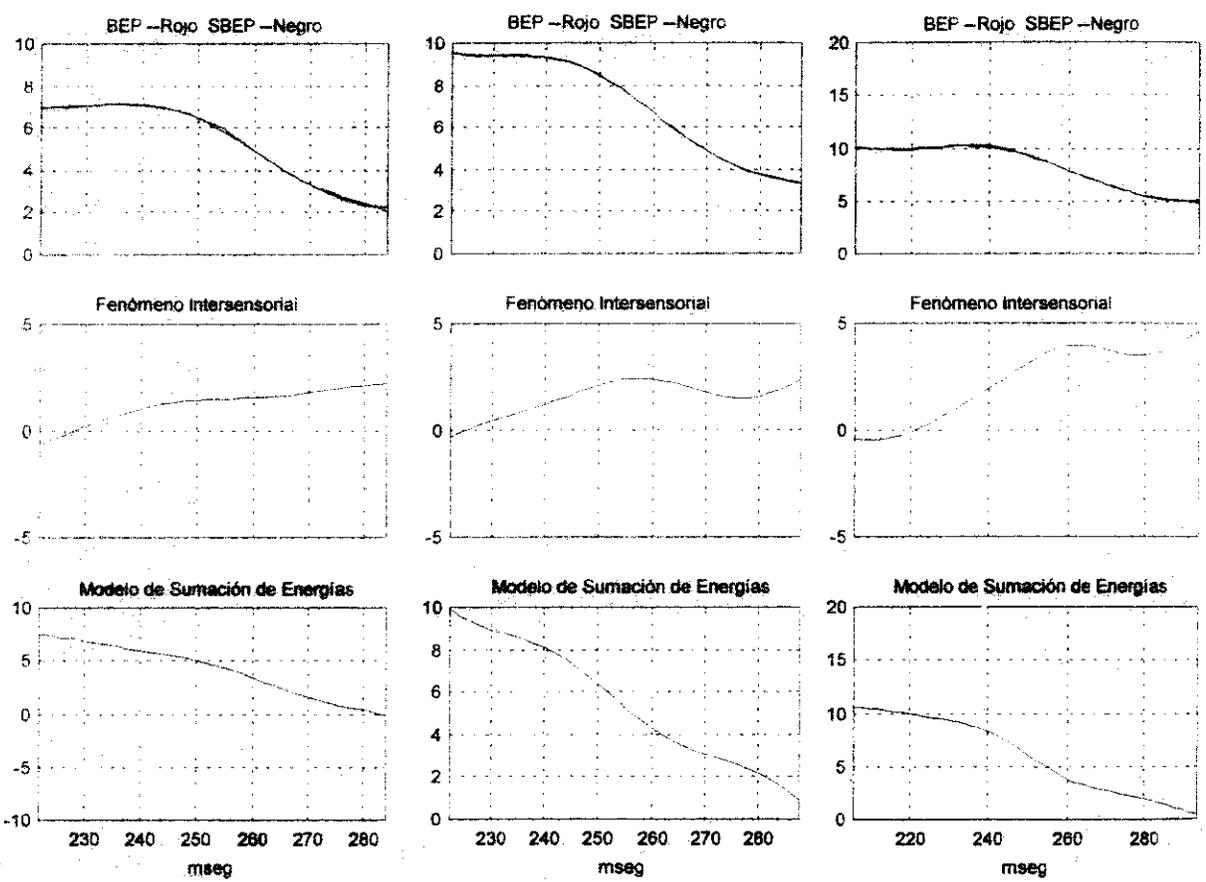


Figura VIII.3.15. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

TABLE VIII.3							
Coeficientes del Modelo No-Linear para la Segunda Ventana de Análisis.							
F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.086	$u_A(n-1)u_A(n-11)$	+0.321	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+1.079	$u_A(n-1)$	+0.408	$u_A(n-7)$
-0.073	$u_A(n-1)u_A(n-7)$	+0.014	$u_A(n-1)u_A(n-1)$	-0.084	$u_A(n-2)u_A(n-7)$	+0.243	$u_A(n-1)u_A(n-10)$

+0.013	$u_A(n-4)u_V(n-9)$	-0.536	$u_A(n-2)u_A(n-7)$	+0.040	$u_A(n-7)u_A(n-8)$	-0.229	$u_A(n-2)u_A(n-8)$
+0.005	$u_A(n-11)u_A(n-12)$	+0.250	$u_A(n-7)u_A(n-8)$	+0.368	$u_V(n-6)u_V(n-7)$	+0.032	$u_A(n-10)u_V(n-1)$
-0.794	$u_V(n-8)u_V(n-12)$	-0.074	$u_V(n-6)u_V(n-7)$	-0.047	$u_V(n-7)u_V(n-8)$	-0.068	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
-0.172	$u_V(n-9)u_V(n-12)$	-0.017	$u_V(n-7)u_V(n-8)$			-0.011	$u_V(n-9)u_V(n-10)$
+1.365	$u_V(n-10)u_V(n-11)$						
+0.148	$u_V(n-10)u_V(n-12)$						
-0.721	$u_V(n-11)u_V(n-12)$						

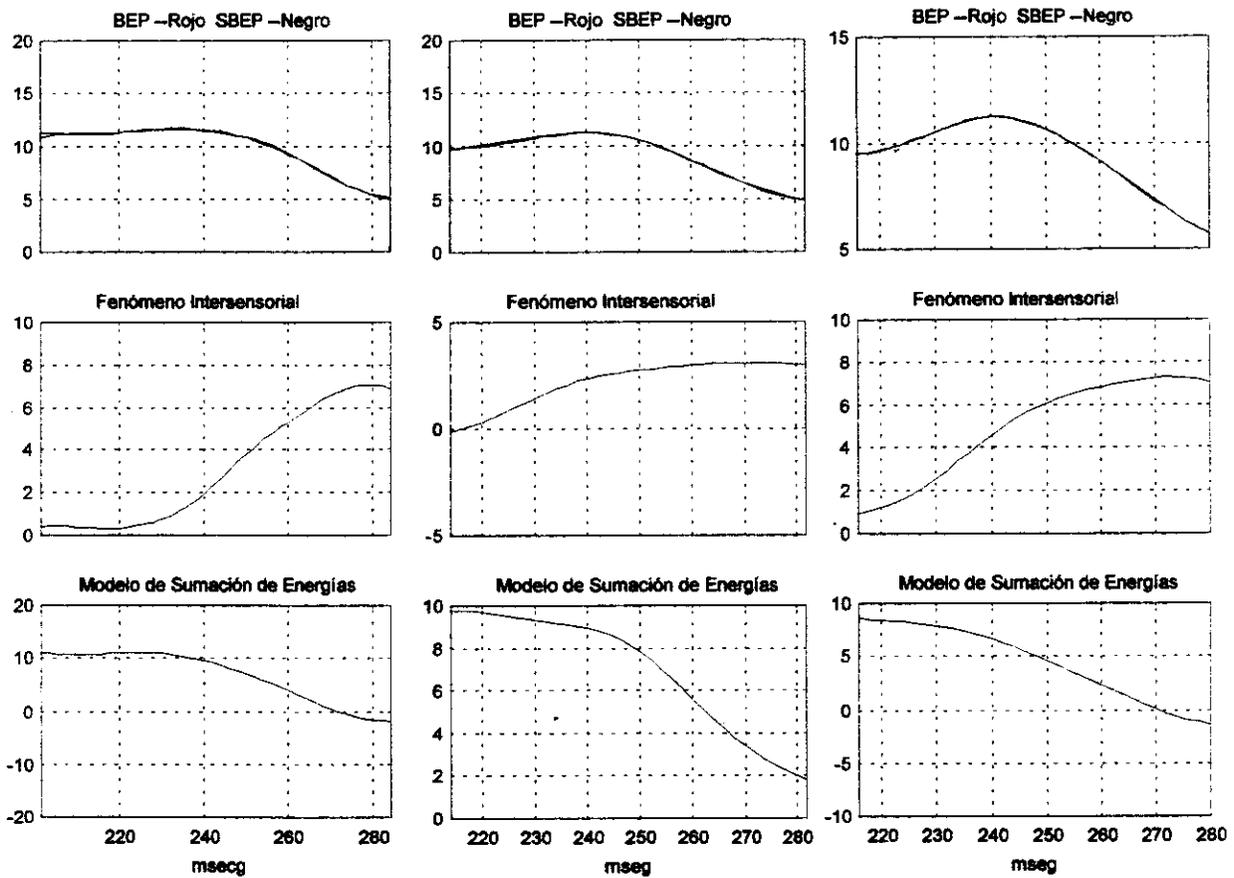


Figura VIII.3.16. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLE VIII.3.3 (Cont.)							
C4		P3		Pz		P4	
+0.139	$u_A(n-8)$	+1.139	$u_A(n-1)$	+0.451	$u_A(n-5)$	+0.182	$u_A(n-1)u_A(n-12)$
+0.069	$u_A(n-1)u_V(n-6)$	+0.074	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.066	$u_A(n-1)u_A(n-12)$	-0.169	$u_A(n-2)u_A(n-11)$
-0.028	$u_A(n-5)u_V(n-6)$	+0.103	$u_A(n-1)u_V(n-12)$	+0.034	$u_A(n-6)u_V(n-1)$	+0.160	$u_A(n-5)u_A(n-7)$
+0.036	$u_V(n-6)u_V(n-7)$	-0.120	$u_V(n-10)u_V(n-12)$	-0.061	$u_V(n-11)u_V(n-12)$	+0.025	$u_A(n-8)u_V(n-4)$
-0.071	$u_V(n-7)u_V(n-8)$					+0.077	$u_A(n-12)u_V(n-6)$
						-0.067	$u_V(n-11)u_V(n-12)$

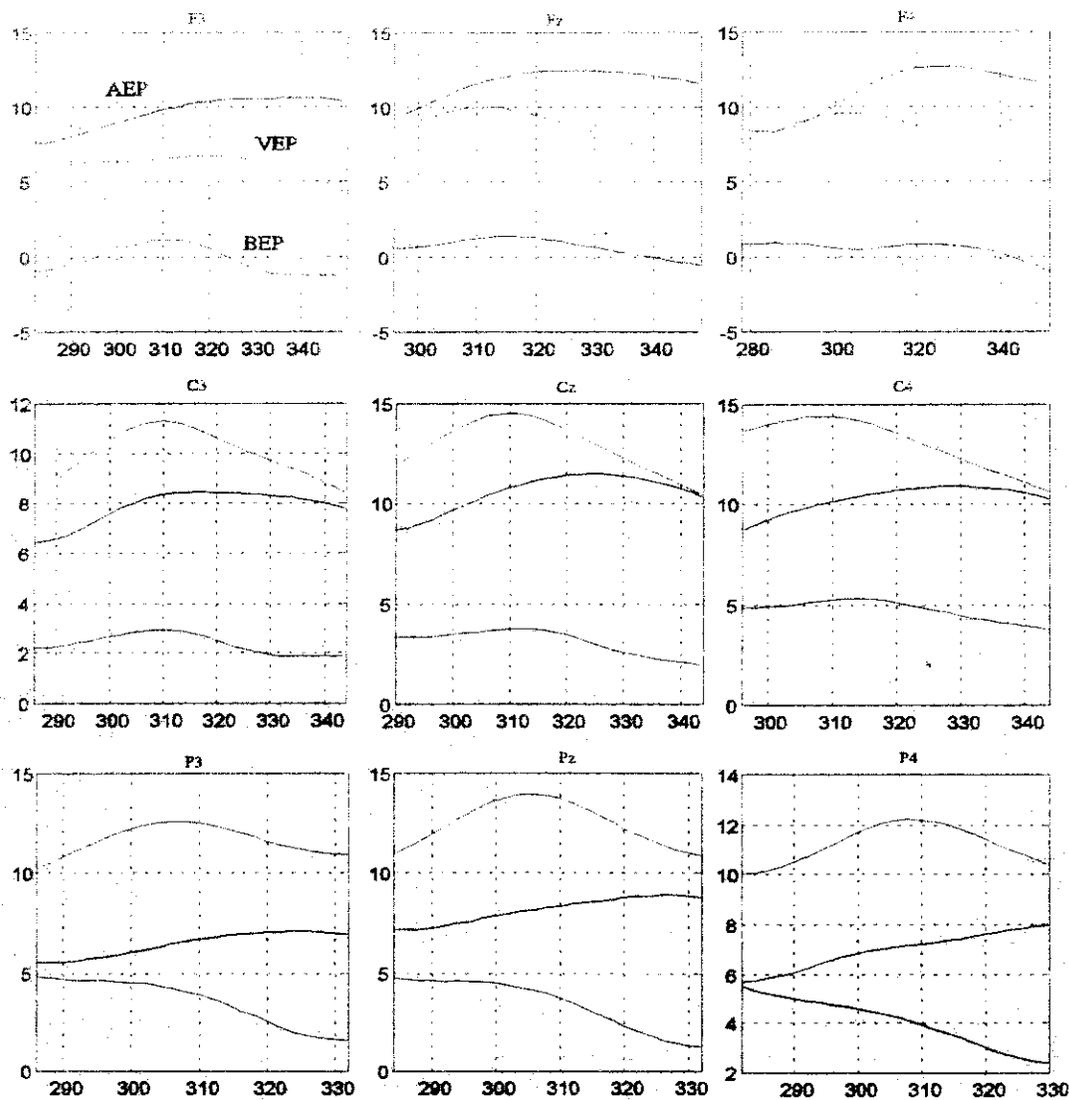


Figura VIII.3.17. Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea.

La actividad eléctrica correspondiente a los componentes P300 unimodales y bimodal, tercera ventana de análisis, se muestra en la figura VIII.3.17. La pequeña amplitud del componente bimodal P300 es consistente en todos los electrodos, sugiriendo que se originan fenómenos de facilitación en la segunda ventana de análisis. El modelo no-lineal, figuras VIII.3.18-20, muestran que la contribución no-lineal esta presente en la génesis de la actividad bimodal y es más intensa en la región del vertex. Sin embargo, debido a la pequeña amplitud del componente bimodal P300 no es posible concluir acerca de los efectos de interacción entre las trayectorias sensoriales visual y auditiva y su análisis es pospuesto para los siguientes experimentos. Los coeficientes del modelo no-lineal

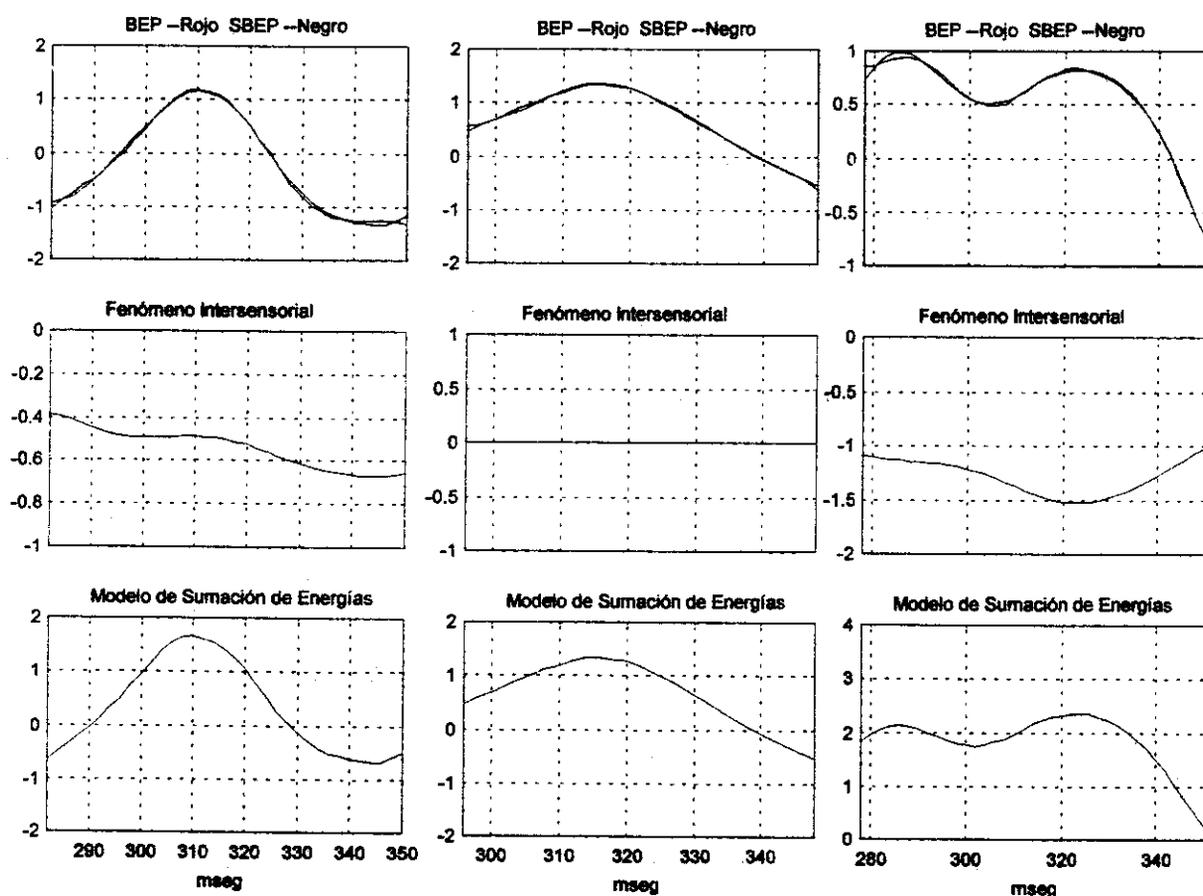


Figura VIII.3.18. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

obtenidos para la tercera ventana se incluyen en la tabla VIII.3.4.

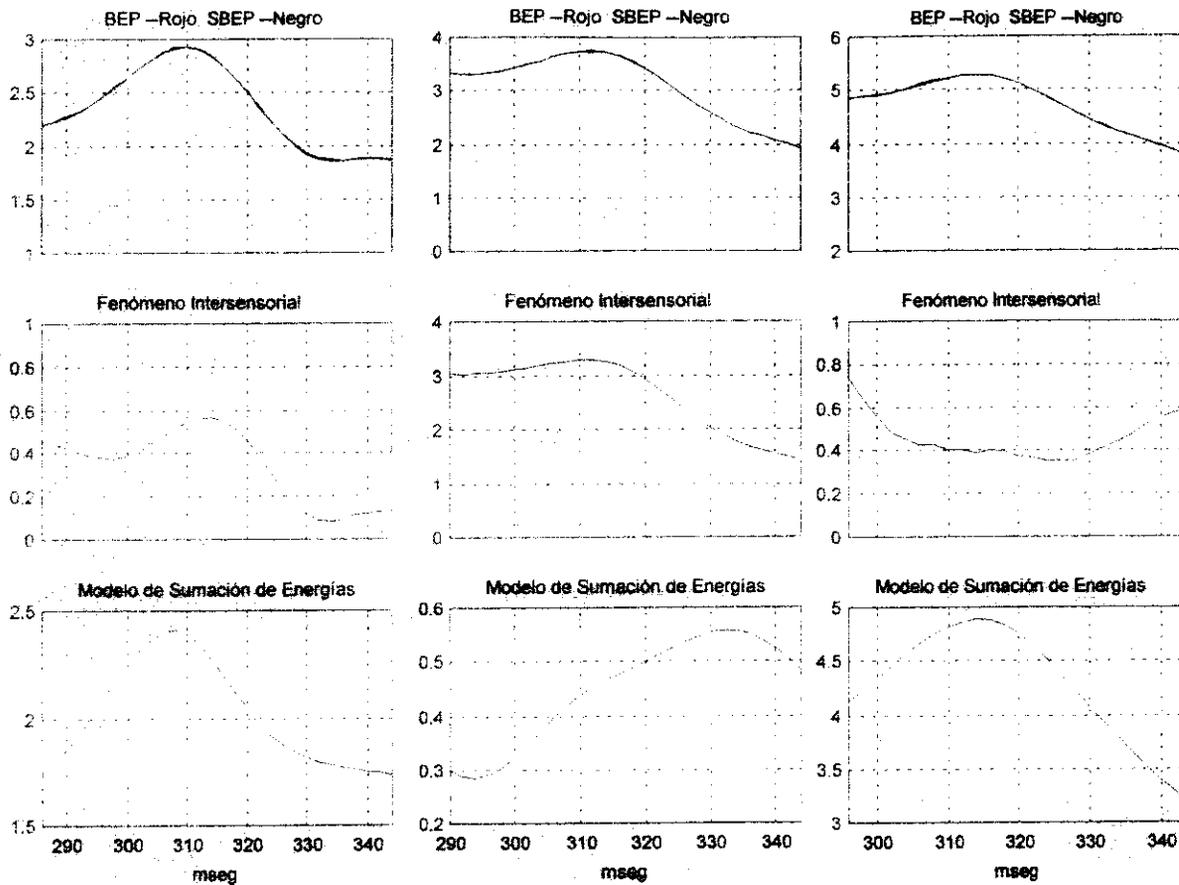


Figura VIII.3.19. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

TABLE VIII.3.4
Coefficientes del Modelo No-Linear para la Tercera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.915	$u_A(n-1)$	-0.554	$u_A(n-15)$	-1.075	$u_A(n-1)$	+0.553	$u_A(n-5)$
+0.107	$u_A(n-11)u_A(n-18)$	-0.908	$u_A(n-9)$	+1.334	$u_A(n-10)$	+0.876	$u_A(n-1)$
-0.168	$u_A(n-14)u_A(n-15)$	+0.039	$u_A(n-1)u_A(n-3)$	+0.018	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	-0.051	$u_A(n-4)u_A(n-9)$

-0.010	$u_A(n-16)u_V(n-8)$	+0.010	$u_A(n-6)u_V(n-9)$	-0.015	$u_A(n-8)u_V(n-2)$	+0.035	$u_A(n-11)u_V(n-5)$
-0.104	$u_V(n-2)u_V(n-10)$	+0.010	$u_A(n-14)u_V(n-4)$	+0.008	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	-0.040	$u_A(n-13)u_V(n-10)$
		+0.083	$u_A(n-15)u_V(n-1)$			+0.008	$u_A(n-15)u_V(n-15)$

C4		P3		Pz		P4	
+0.062	$u_V(n-2)$	+0.243	$u_A(n-3)u_A(n-7)$	+0.080	$u_A(n-5)u_A(n-7)$	+0.895	$u_V(n-7)$
+0.008	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.079	$u_A(n-5)u_V(n-14)$	-0.043	$u_A(n-6)u_V(n-15)$	+0.165	$u_A(n-1)u_V(n-1)$
-0.068	$u_A(n-4)u_V(n-3)$	+0.072	$u_A(n-14)u_V(n-1)$	+0.047	$u_A(n-15)u_V(n-1)$	-0.383	$u_A(n-1)u_V(n-6)$
+0.067	$u_A(n-7)u_V(n-1)$	-0.054	$u_V(n-13)u_V(n-14)$	-0.020	$u_V(n-14)u_V(n-15)$	-0.138	$u_A(n-4)u_A(n-6)$
+0.019	$u_V(n-3)u_V(n-5)$					+0.230	$u_A(n-4)u_V(n-8)$

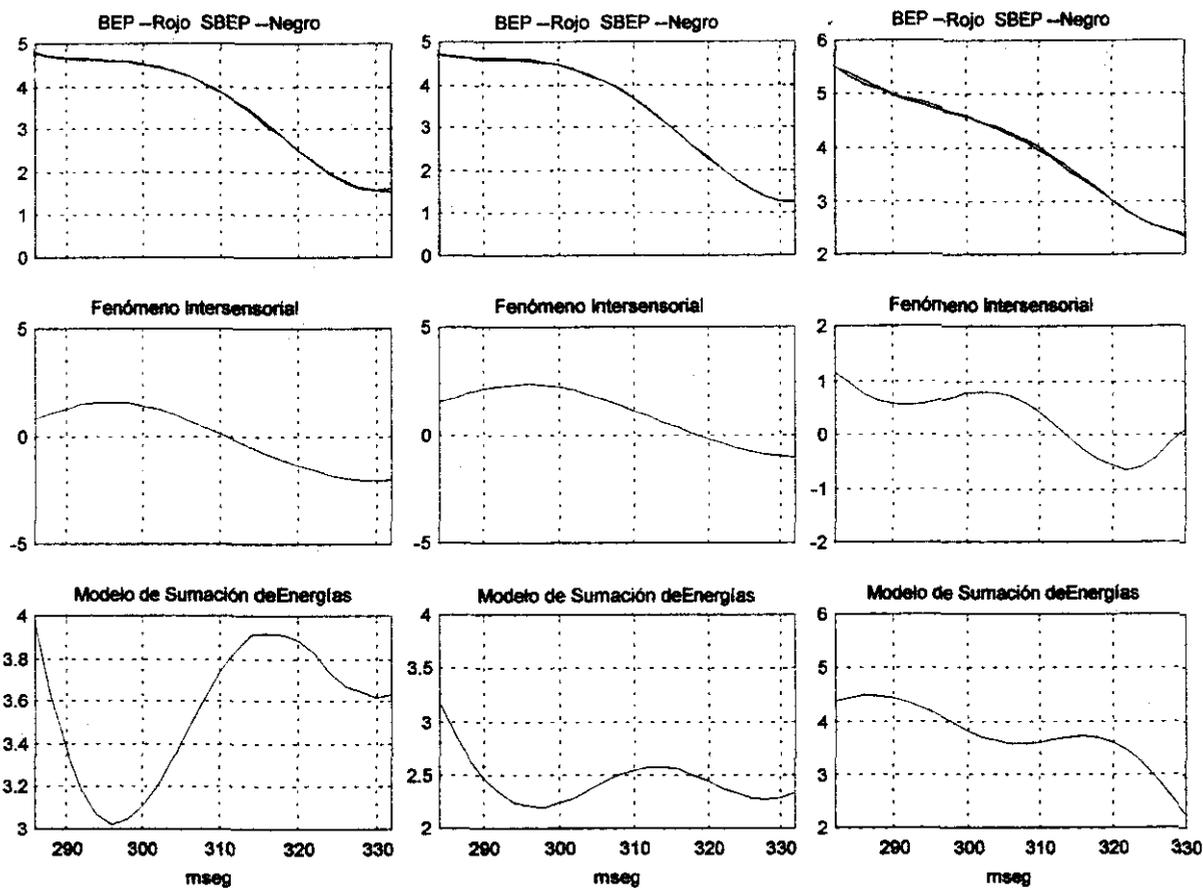


Figura VIII.3.20. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

Los resultados del segundo experimento muestran que un estímulo accesorio puede modificar los procesos subyacentes en la vía sensorial relevante. Las interacciones del tipo no-lineal se reflejan en los componentes exógenos bimodales N100, P200 y procesos bimodales cognoscitivos. Parece ser que la interacción no-lineal es influenciada por el paradigma utilizado.

VIII.4. Experimento # 3

En el primer y segundo experimento no se consideró alguna relación entre el estímulo visual y el estímulo auditivo. En el presente experimento se establece una relación entre estímulos al solicitar al sujeto responder a una combinación específica de la información auditiva y visual. La figura VIII.4.1(a) muestra los potenciales evocados unimodales y bimodal adquiridos en el electrodo Cz, la actividad eléctrica corresponde a un intervalo entre 60 y 690 milisegundos. En la figura puede observarse que tanto la información auditiva como visual están presentes en la morfología del potencial evocado bimodal. El resultado del modelo lineal, mostrado en la figura VIII.4.1(b), indica que existen procesos más complejos involucrados en la génesis del potencial bimodal debido a que la señal sintetizada no se ajusta a la morfología del potencial bimodal adquirido. En la figura VIII.4.1(c) se muestra un mejor ajuste al utilizar un modelo no-lineal aplicado a toda la señal, sin

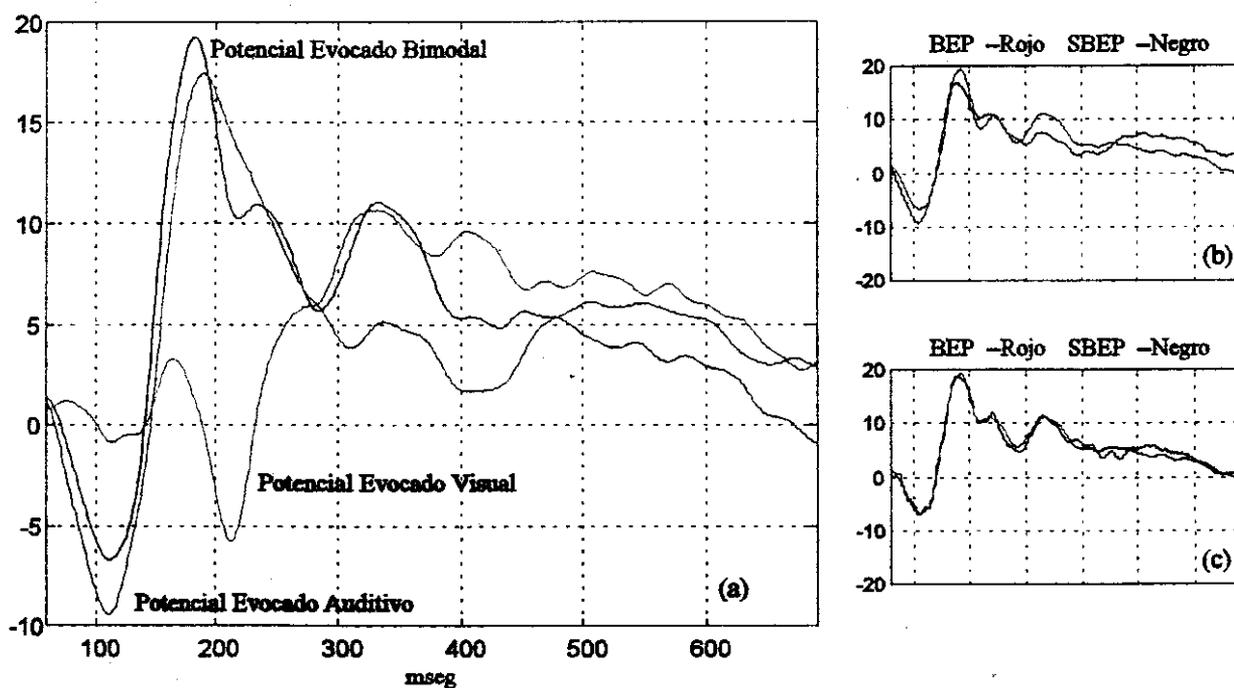


Figura VIII.4.1. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

embargo, existen ciertas desviaciones que se minimizarán al emplear un modelado por segmentos de la señal.

Los resultados del modelo no-lineal se presentan en forma completa para la actividad eléctrica en el electrodo Cz, incluyendo la contribución lineal, la contribución del fenómeno intrasensorial, la sumación de energías y la contribución del fenómeno intersensorial. Posteriormente, se resumen los resultados obtenidos para las señales de los electrodos restantes, enfocándose en la contribución del fenómeno intersensorial y la contribución del modelo de sumación de energías.

VIII.4.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz.

De acuerdo con el criterio de segmentación propuesto en el primer experimento, la primera ventana de análisis se define de los 60 milisegundos hasta los 218 milisegundos, figura VIII.4.2(a). Como se observa, la morfología del potencial evocado auditivo se aproxima a la morfología del potencial bimodal. Sin embargo, existen desviaciones en amplitud y latencia de los componentes N100 y P200, que posiblemente se deban a la interacción de las vías sensoriales visual y auditiva.

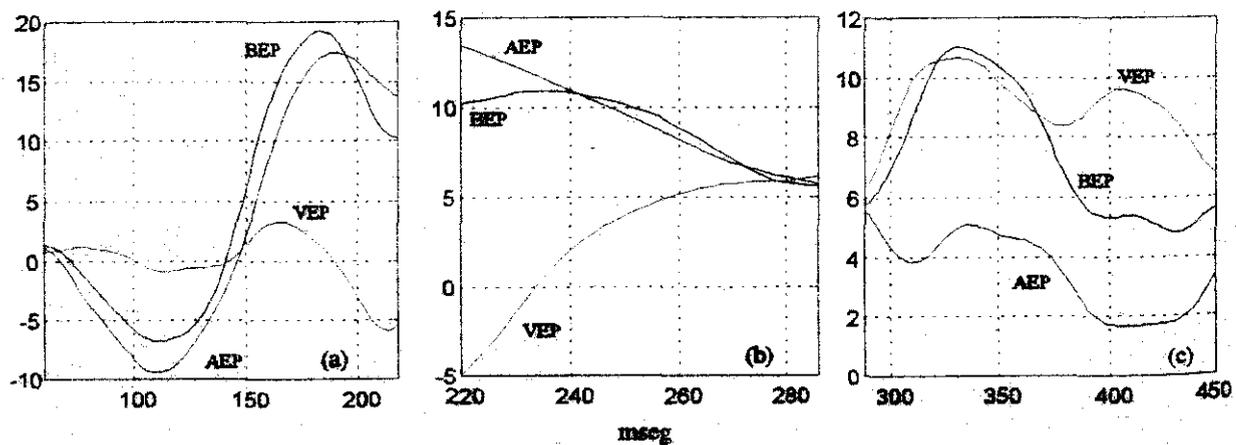


Figura VIII.4.2. Ventanas de tiempo. Se muestra el potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP).

Los resultados del modelado no-lineal, figura VIII.4.3(a)-(e), muestran que el modelo de sumación de energías de las actividades unimodales es suficiente para explicar la generación del potencial bimodal hasta los 160 milisegundos. Por otra parte, se requiere incluir términos cruzados de información visual-auditiva para sintetizar el componente bimodal P200, indicando que procesos no-lineales se llevaron a efecto en este intervalo de tiempo. Los coeficientes del modelo NARX que reflejan el comportamiento lineal y no-lineal se reportan en la tabla VIII.4.1.

La segunda ventana de análisis, considerada de los 220 a los 286 milisegundos, involucra las

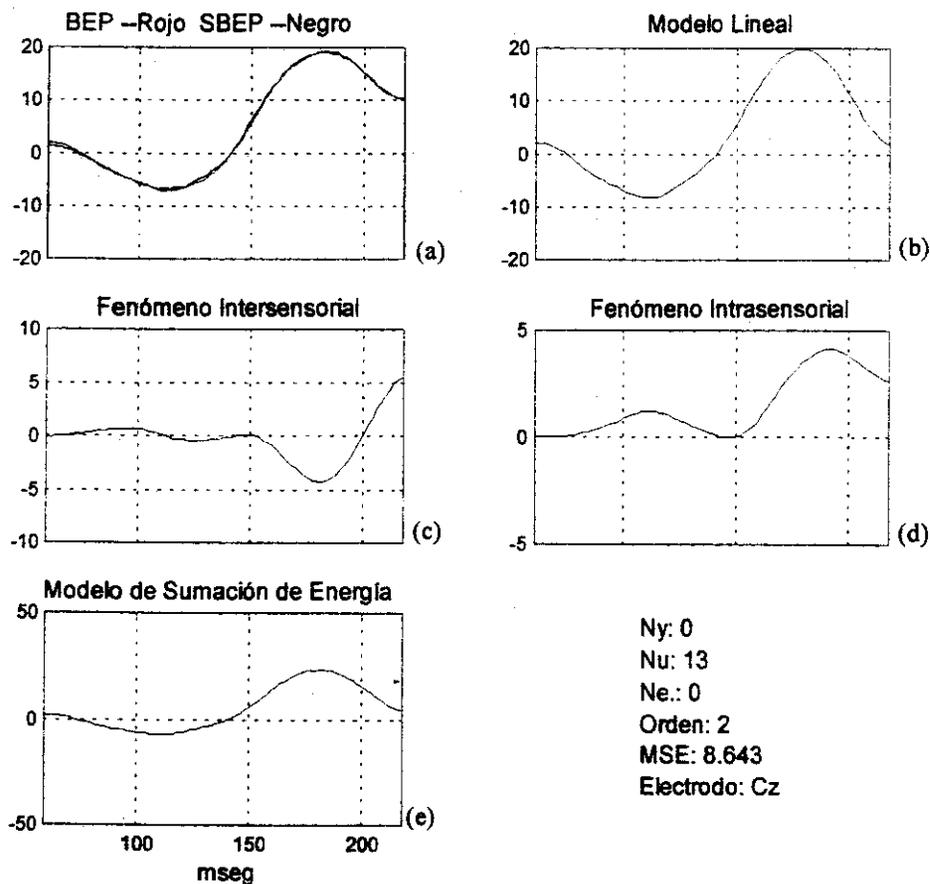


Figura VIII.4.3. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

actividades eléctricas que pueden relacionarse con el proceso de categorización del estímulo auditivo y con el proceso de post-categorización del estímulo visual, estas actividades se localizan antes y después de los componentes N200 visual y auditivo, figura VIII.4.2(b). De acuerdo a los resultados del modelo no-lineal mostrados en la figura VIII.4.4, es importante la contribución del modelo lineal y no-lineal, sin embargo, el modelo lineal y la contribución del fenómeno intrasensorial se originan de la actividad eléctrica de la vía sensorial auditiva, figura VIII.4.4(a)-(e). El fenómeno intersensorial presenta una pendiente positiva hasta los 240 milisegundos, y después se mantiene constante. El

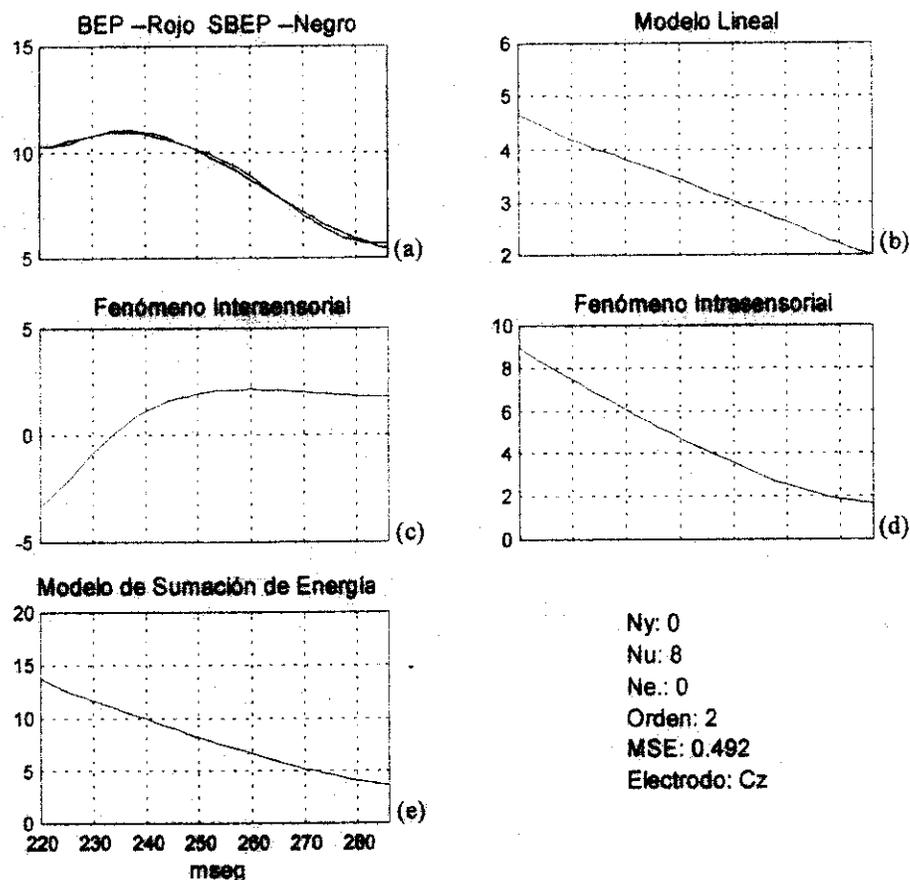


Figura VIII.4.4. Modelo no-lineal. (a) Potencial estado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

comportamiento anterior posiblemente se relacione con el incremento del proceso de post-categorización visual. Como se observa, el pico bimodal alrededor de los 240 milisegundos presenta una coincidencia temporal con el punto en donde la información visual cognoscitiva ha alcanzado una cierta amplitud. Probablemente, la forma de onda bimodal alrededor de los 240 milisegundos representa la latencia en donde el sujeto termina el proceso de categorización del estímulo. Se puede pensar que el proceso de post-categorización visual interactúa con el proceso de categorización auditiva para iniciar el proceso de decisión, debido a que el componente bimodal N200 aparece más

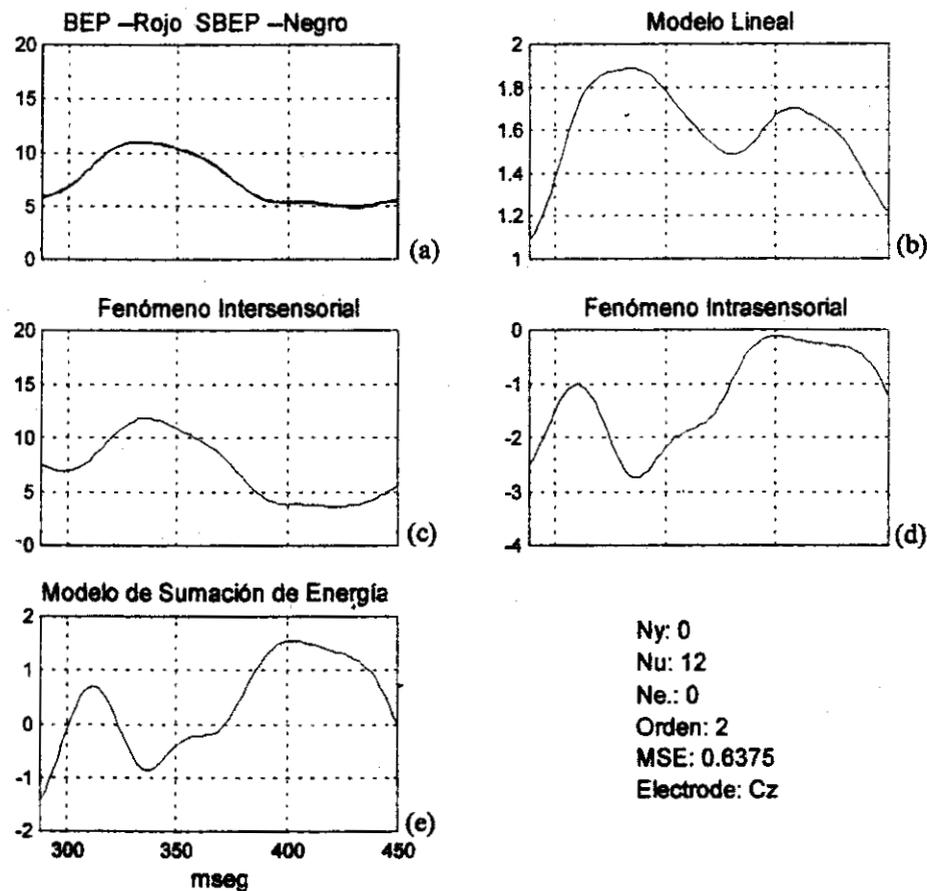


Figura VIII.4.5. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

temprano que el componente N200 auditivo. Los coeficientes del modelo NARX reportados en la tabla VIII.4.1 muestran un predominio de la información auditiva, tanto en la contribución lineal como en la intrasensorial.

TABLE VIII.4.1
Coefficientes del Modelo No-Lineal.

Primera ventana		Segunda ventana		Tercera ventana	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.959	$u_A(n-1)$	+0.298	$u_A(n-8)$	+0.177	$u_V(n-2)$
+0.373	$u_A(n-9)$	+0.050	$u_A(n-1)*u_V(n-1)$	-0.148	$u_A(n-1)*u_A(n-2)$
-0.650	$u_A(n-13)$	+0.045	$u_A(n-3)*u_A(n-4)$	+0.054	$u_A(n-1)*u_A(n-12)$
+1.00	$u_V(n-1)$			+0.007	$u_A(n-1)*u_V(n-3)$
+0.816	$u_V(n-13)$			-0.099	$u_A(n-3)*u_V(n-1)$
+0.013	$u_A(n-1)*u_A(n-2)$			+0.022	$u_A(n-12)*u_V(n-1)$
-0.053	$u_A(n-1)*u_V(n-3)$				
-0.044	$u_A(n-1)*u_V(n-11)$				

La tercera ventana de análisis inicia en los 288 milisegundos y termina en los 450 milisegundos, figura VIII.4.2(c). En esta ventana de análisis se incluyen los componentes visuales P300a y P300b y los componentes auditivos N200 y P300a, es decir, se incluyen el proceso de cierre visual, el final del proceso de categorización auditivo y el inicio del proceso de cierre auditivo. Además, en esta tercera ventana se incluye el componente P300 bimodal.

En este segmento de tiempo la actividad bimodal sigue de forma más cercana a la actividad visual hasta los 350 milisegundos. De acuerdo con los resultados del modelo no-lineal, figura VIII.4.5(a)-(c), la actividad intersensorial es predominante en comparación con la contribución del modo de sustracción de energía. Parece ser que la información cognoscitiva auditiva representada por

la onda P300a interactúa con el proceso cognoscitivo visual para decidir que se ha presentado la combinación de estímulos "target". Lo anterior es soportado por el hecho de que la actividad del fenómeno intersensorial presenta una transición alrededor de los 350 milisegundos, latencia que corresponde al punto en donde la P300a auditiva empieza a disminuir. En resumen, la actividad bimodal se ve afectada primero por la actividad visual hasta los 350 milisegundos, y posteriormente, por la actividad auditiva, figura VIII.4.2(c). Los coeficientes del modelo NARX se reportan en la tabla VIII.4.1.

Después de los 450 milisegundos, figura VIII.4.1(a), todavía existe información visual y auditiva mientras que la actividad bimodal comienza a decrementarse a partir de lo 400 milisegundos, por esta razón, el modelo no-lineal únicamente se aplica hasta los 450 milisegundos.

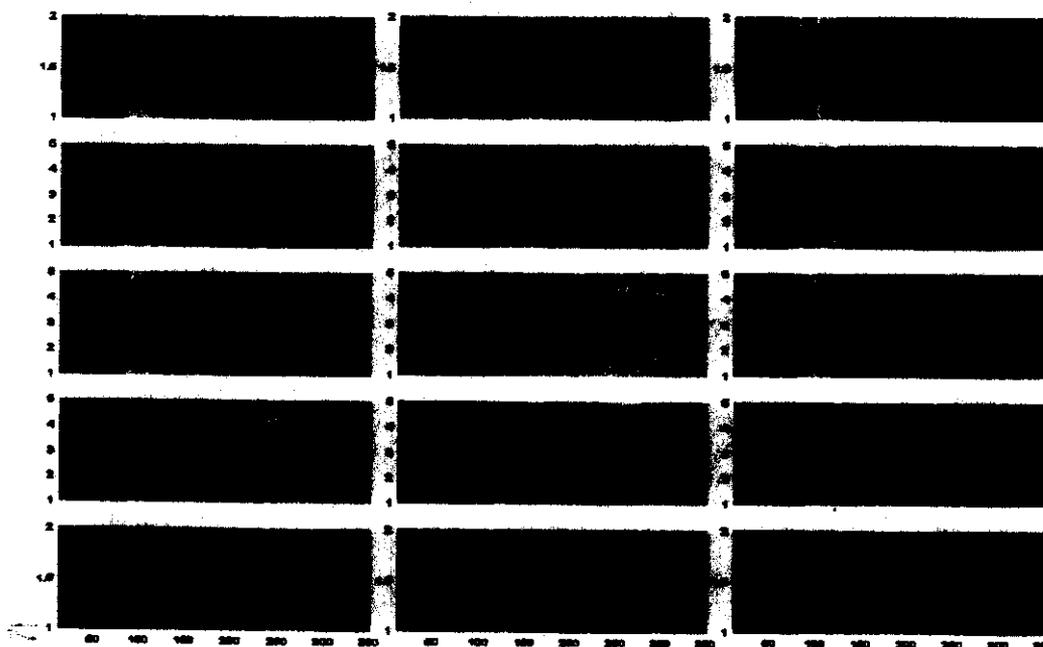


Figura VIII.4.6. representación horizontal de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos occipitales del sistema 10-20.

En comparación con el segundo experimento, en donde únicamente un evento de categorización del estímulo se definió perfectamente mediante una onda bimodal, en el presente experimento se obtuvo una nueva y bien definida onda asociada al proceso cognoscitivo de decisión o cierre, figura VIII.4.2(c). El componente P300b bimodal se genera en forma más temprana, y con una amplitud mayor que cualquiera de los componentes P300b unimodales. De acuerdo con los resultados del modelo no-lineal, parece ser que la información contenida en la tercera ventana de análisis, aún sin incluir el proceso auditivo cognoscitivo completo, es suficiente para desarrollar el proceso cognoscitivo de decisión bimodal.

VIII.4.2 Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

El comportamiento espacial del modelo no-lineal es realizado utilizando la información adquirida en los electrodos F3, Fz, F4, C3, C4, P3, Pz y P4. Con el propósito de entender mejor el

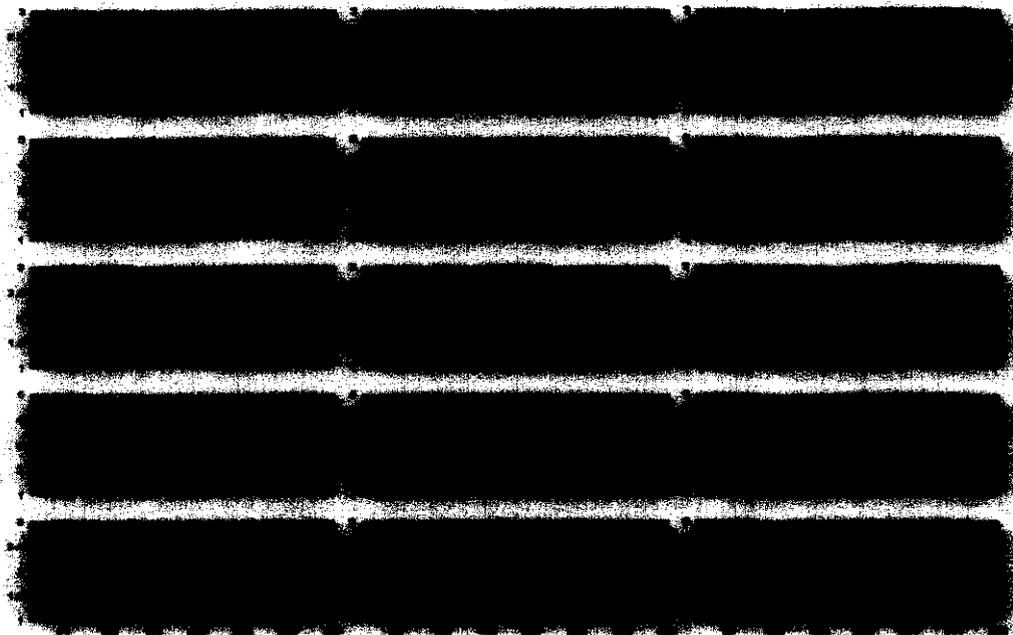


Figura VIII.4.7. representación horizontal de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos P3, T4 y T6 del sistema 10-20.

fenómeno que se origina cuando la información visual y auditiva son relevantes, en la figuras VIII.4.6 y VIII.4.7 se muestra la representación espacial de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La distribución de las actividades se muestra en el formato horizontal y vertical explicado en detalle en la introducción del presente capítulo.

En la representación horizontal, figura VIII.4.6, se muestra una actividad auditiva exógena y un proceso de categorización del estímulo ubicados en la región fronto-central, mientras que el proceso de decisión se genera predominantemente en la región parietal. La actividad eléctrica visual correspondiente a los componentes exógenos, proceso de categorización y proceso de cierre muestra una amplitud mayor en las regiones parietal y central. Los componentes bimodales N100 y P200 presentan una actividad localizada en la región fronto-central mientras que el componente P300 es

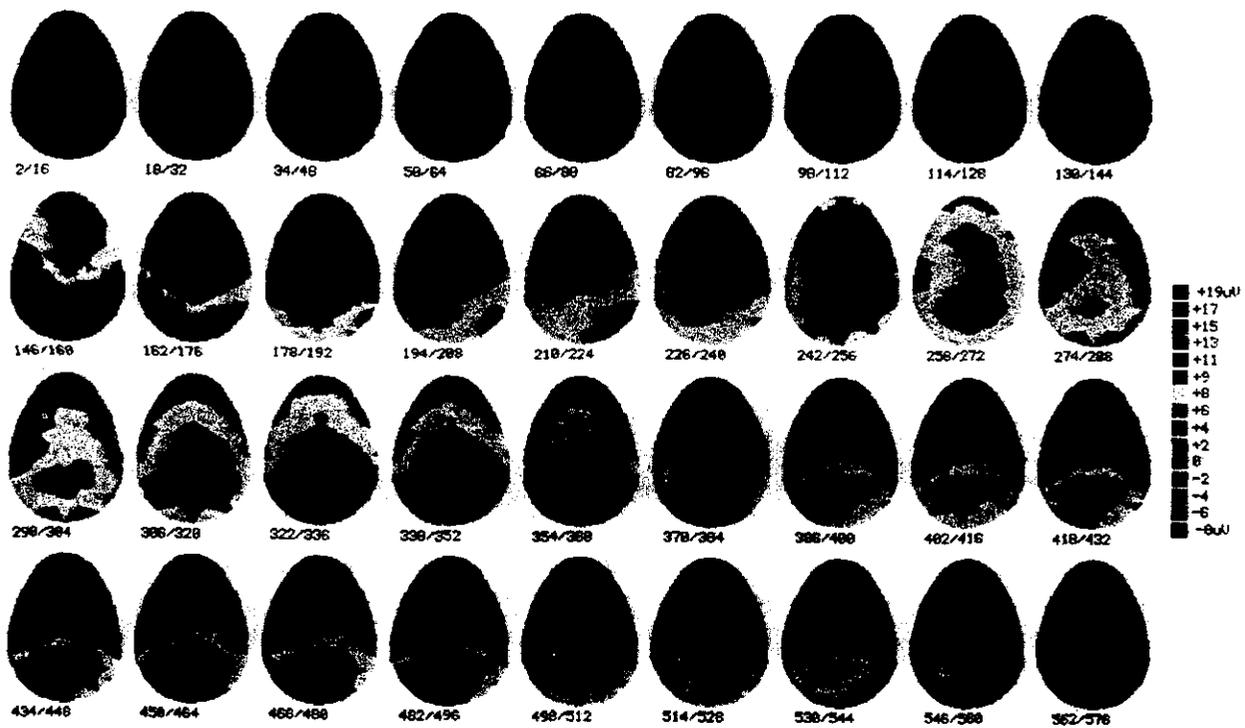


Figura VIII.4.8. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

prominente en la región parietal.

En la representación vertical, los componentes auditivos N100 y P200 parecen presentar simetría y la actividad cognoscitiva es dominante en el electrodo Pz. La representación visual resalta la simetría de los componentes exógenos y un componente N200 ubicado en el vértex mientras que el proceso de categorización del estímulo y de decisión se ubican en la región vértex-parietal con una ligera lateralización hacia el hemisferio izquierdo. Los componentes exógenos bimodales presentan una distribución simétrica mientras que el proceso de categorización presenta lateralización hacia la izquierda. Finalmente, el componente P300 bimodal se ubica en la región parietal con una ligera lateralización hacia la izquierda.

En la figura VIII.4.8 se muestra la distribución espacial del potencial evocado bimodal adquirido mediante mapas topográficos, la resolución entre mapas es de 15 milisegundos. Se observa

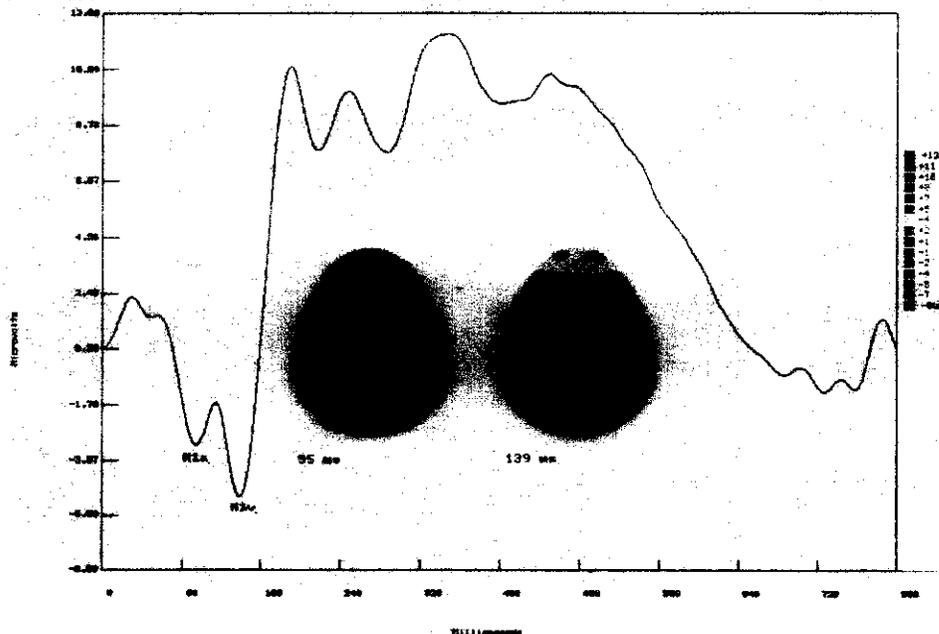


Figura VIII.4.9. Distribución espacial del componente bimodal N100.

una actividad eléctrica bien definida alrededor de los 90 milisegundos, con una actividad central negativa similar a la desarrollada por el componente N100 auditivo. La negatividad se corre hacia la

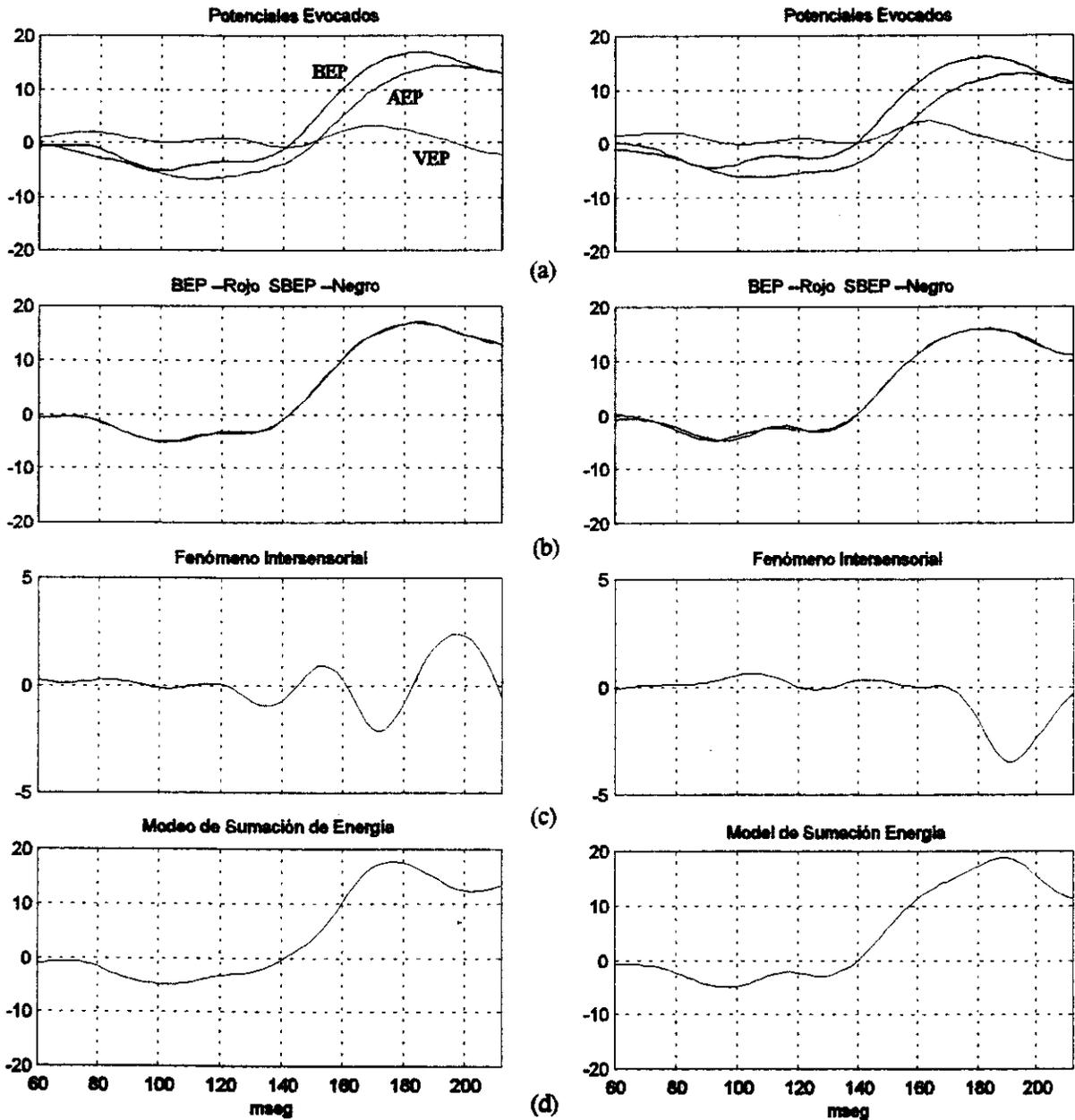


Figura VIII.4.10. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos F3 y F4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

región parietal-occipital generando una distribución similar al componente N100 visual. El fenómeno de "switch", explicado en el primer experimento, se muestra en la figura VIII.4.9 para el electrodo

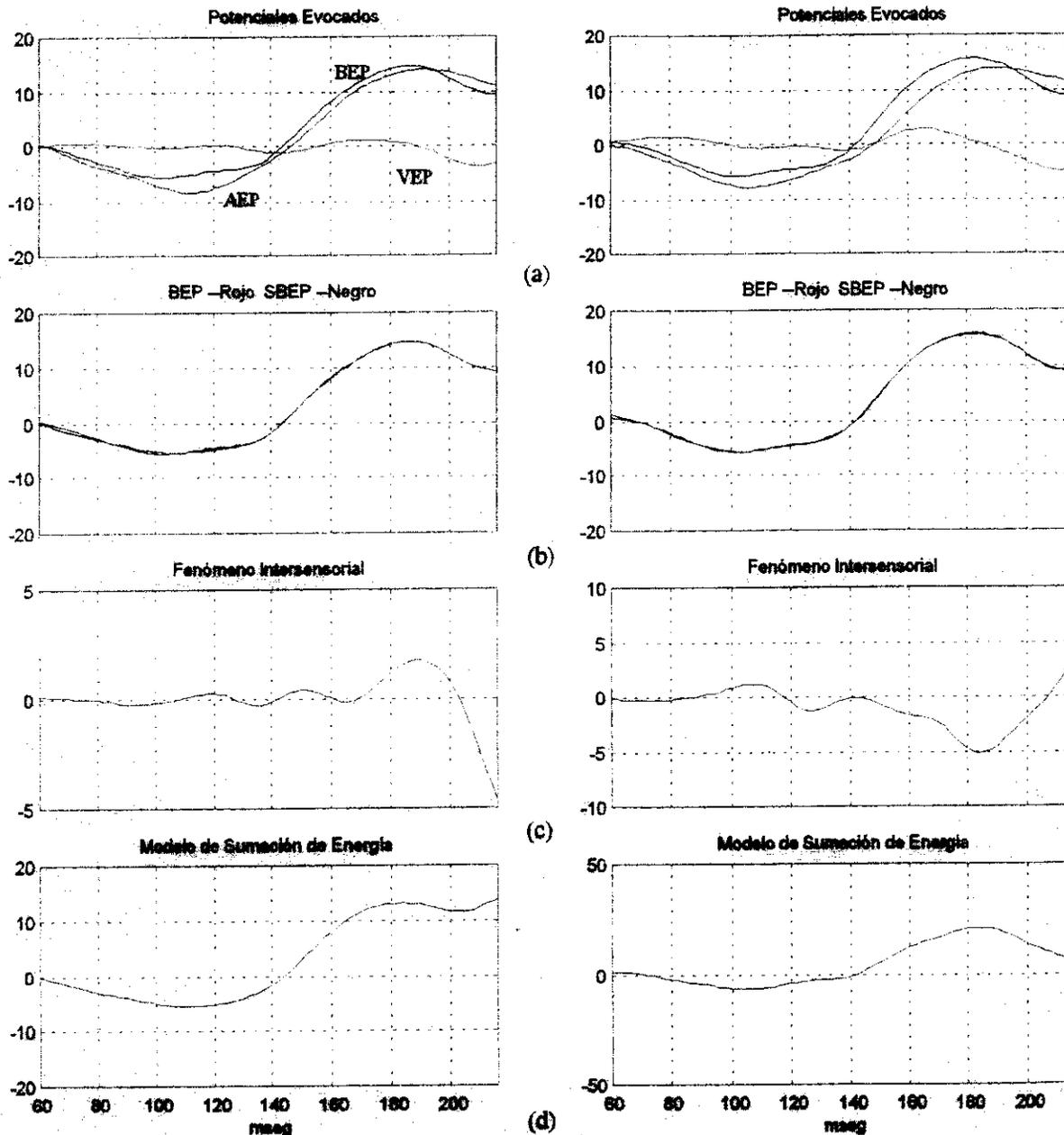


Figura VIII.4.11. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado binaural (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos C3 y C4, (b) potencial evocado binaural adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intersensorial.

P3, en donde es más evidente. Una actividad fronto-central positiva se desarrolla desde los 162 milisegundos hasta los 192 milisegundos definiendo el componente bimodal P200. La actividad eléctrica parece extenderse hacia el vértex alrededor de los 250 milisegundos, sin embargo, en general

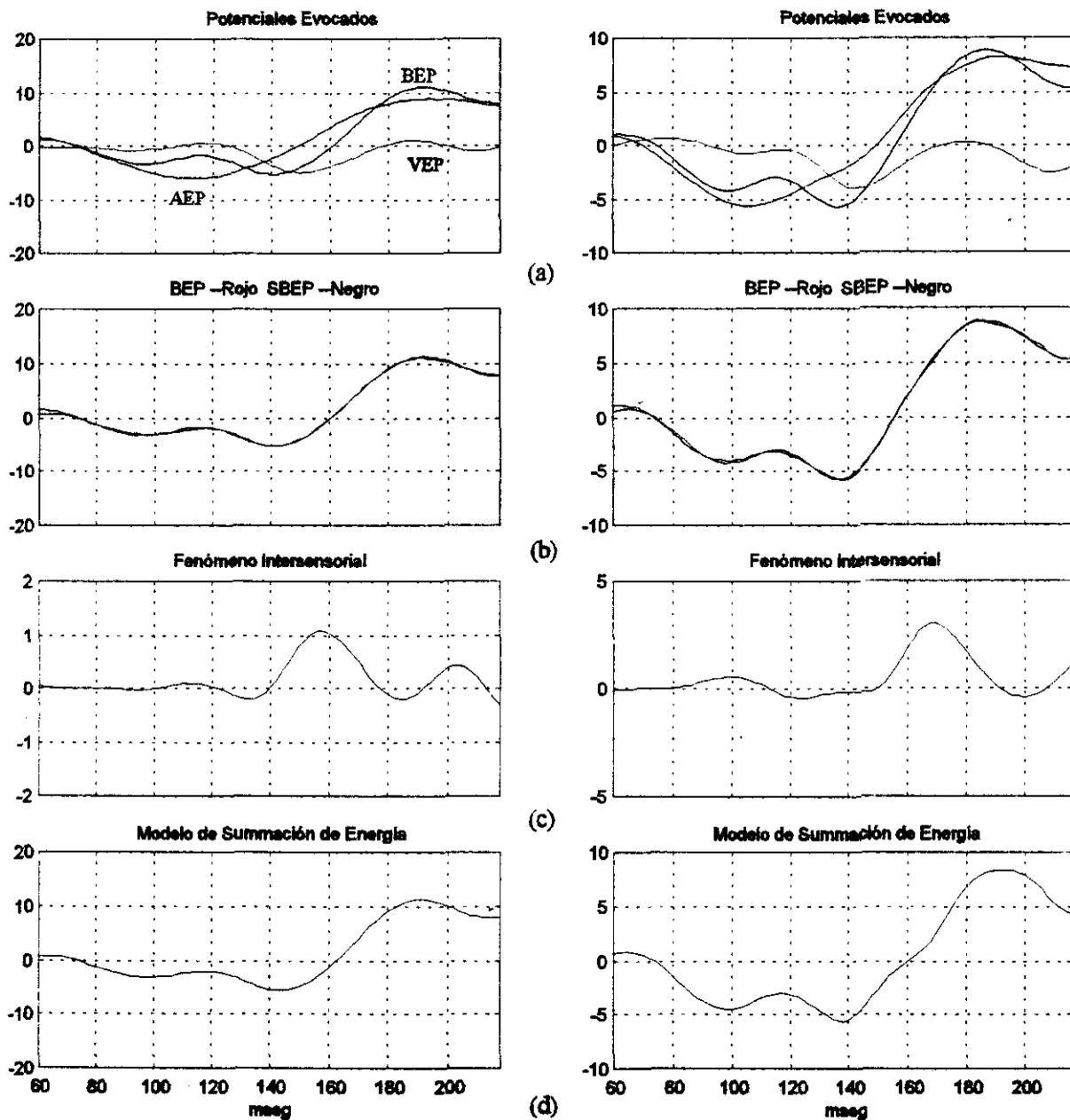


Figura VIII.4.12. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado-auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos P3 y P4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

se observa que la actividad eléctrica presenta una distribución amplia sobre el cráneo. El componente P300 se desarrolla posteriormente con una distribución parieto-occipital.

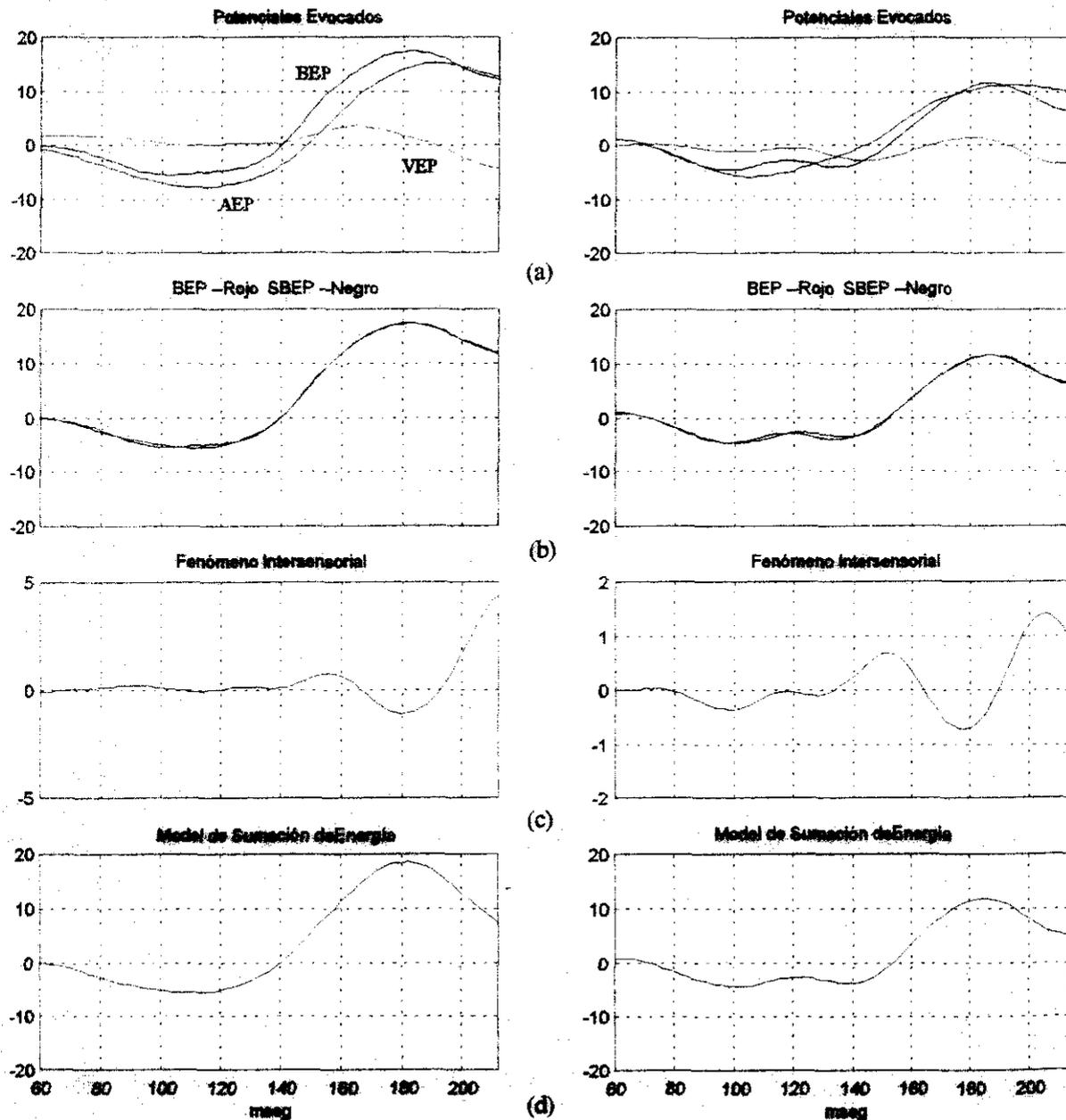


Figura VIII.4.13. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos Fz y Pz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

VIII.4.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal.

Los resultados del modelo no-lineal para todos los electrodos utilizados en el experimento, para la primera ventana de análisis, se resumen en la tabla VIII.4.2. Los resultados indican que en los electrodos frontales, figura VIII.4.10(a), el modelo no-lineal revela que el componente N100 bimodal puede ser sintetizado por el modelo de sumación de energías, figura VIII.4.10(d). El modelo también indica que después de los 140 milisegundos se incluyen productos cruzados unimodales, sugiriendo que el componente bimodal P200 refleja interacciones sensoriales, figura VIII.4.10(c).

Un comportamiento similar se observa en la región del vértex para el componente bimodal N100, figura VIII.4.11(a)-(d), mientras que para el componente bimodal P200 existe un incremento en el comportamiento no-lineal en la región del vértex siendo prominente en el electrodo C4, figura VIII.4.11(c).

Los potenciales evocados en la región parietal se muestran en la figura VIII.4.12. Como puede observarse existe una diferencia morfológica importante entre los potenciales evocados unimodales y bimodales en comparación con los potenciales registrados en las regiones frontales y centrales. En la región parietal, el potencial evocado bimodal presenta una desviación importante con respecto a la actividad auditiva, figura VIII.4.12(a). Es evidente el incremento de la actividad visual alrededor de los 150 milisegundos, el decremento de la actividad auditiva alrededor de los 110 y 190 milisegundos así como la división de la actividad bimodal. El fenómeno de "switch" se observa con mayor definición en la figura VIII.4.12(b). Los resultados del modelo no-lineal no reflejan un fenómeno intersensorial significativo para el componente bimodal N100 a la latencia correspondiente al componente N100 auditivo. El fenómeno se incrementa a la latencia del componente visual N100. Es posible que las no-linealidades que ocurren para el componente bimodal P200 se combinen con

TABLE VIII.4.2
Coefficientes del Modelo No-Linear para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+1.087	$u_A(n-1)$	+1.291	$u_A(n-1)$	+1.346	$u_A(n-1)$	+1.058	$u_A(n-1)$
-0.513	$u_A(n-12)$	-0.610	$u_A(n-12)$	-0.821	$u_A(n-18)$	-0.206	$u_A(n-2)$
-0.905	$u_V(n-5)$	+0.114	$u_V(n-12)$	-0.920	$u_V(n-4)$	-0.085	$u_A(n-8)$
+0.018	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.070	$u_A(n-10)u_V(n-2)$	+1.541	$u_V(n-18)$	-0.584	$u_V(n-8)$
-0.069	$u_A(n-1)u_V(n-7)$	+0.029	$u_V(n-1)u_V(n-11)$	-0.091	$u_A(n-11)u_V(n-13)$	+0.040	$u_A(n-1)u_V(n-2)$
-0.024	$u_A(n-7)u_V(n-1)$			+0.130	$u_V(n-1)u_V(n-5)$	-0.031	$u_A(n-1)u_A(n-8)$
+0.193	$u_A(n-12)u_V(n-7)$			+0.299	$u_V(n-1)u_V(n-16)$	+0.128	$u_A(n-8)u_V(n-8)$
+0.622	$u_V(n-1)u_V(n-2)$					+0.3	$u_V(n-5)u_V(n-6)$
+0.257	$u_V(n-4)u_V(n-12)$						

TABLE VIII.4.2 (Cont.)
Coefficientes del Modelo No-Linear para la Primera Ventana de Análisis.

C4		P3		Pz		P4	
+1.072	$u_A(n-1)$	+0.758	$u_A(n-2)$	+1.210	$u_A(n-1)$	+0.876	$u_A(n-3)$
-0.123	$u_A(n-15)$	-0.026	$u_A(n-5)$	-0.573	$u_A(n-2)$	-0.255	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
+0.619	$u_V(n-1)$	+1.161	$u_V(n-1)$	+1.286	$u_V(n-1)$	-0.149	$u_A(n-1)u_V(n-11)$
+0.852	$u_V(n-15)$	+0.051	$u_A(n-1)u_A(n-3)$	-0.118	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.232	$u_A(n-2)u_A(n-3)$
-0.021	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.004	$u_A(n-5)u_A(n-7)$	+0.030	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.693	$u_A(n-10)u_A(n-11)$
+0.783	$u_A(n-1)u_A(n-14)$	+0.057	$u_A(n-15)u_V(n-8)$	+0.083	$u_A(n-5)u_V(n-2)$	-0.695	$u_A(n-11)u_A(n-12)$
-0.882	$u_A(n-1)u_A(n-15)$	+0.048	$u_V(n-1)u_V(n-2)$			-0.527	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
+0.574	$u_A(n-1)u_V(n-13)$					+0.436	$u_V(n-1)u_V(n-3)$
-0.730	$u_A(n-4)u_V(n-12)$						
+0.097	$u_A(n-12)u_A(n-15)$						
+0.046	$u_A(n-13)u_V(n-3)$						
-0.091	$u_V(n-1)u_V(n-3)$						

las no-linealidades del componente bimodal N100. La figura VIII.4.12 indica que el comportamiento no-lineal en la región parietal es más prominente en el hemisferio derecho.

La información a partir de los electrodos Fz y Pz, figura VIII.4.13, indica los efectos de la

detección del fenómeno de "switch" en el modelo no-lineal, debido a que el fenómeno intersensorial se inicia en forma temprana en el electrodo Pz. Comparando con los resultados del modelo no-lineal

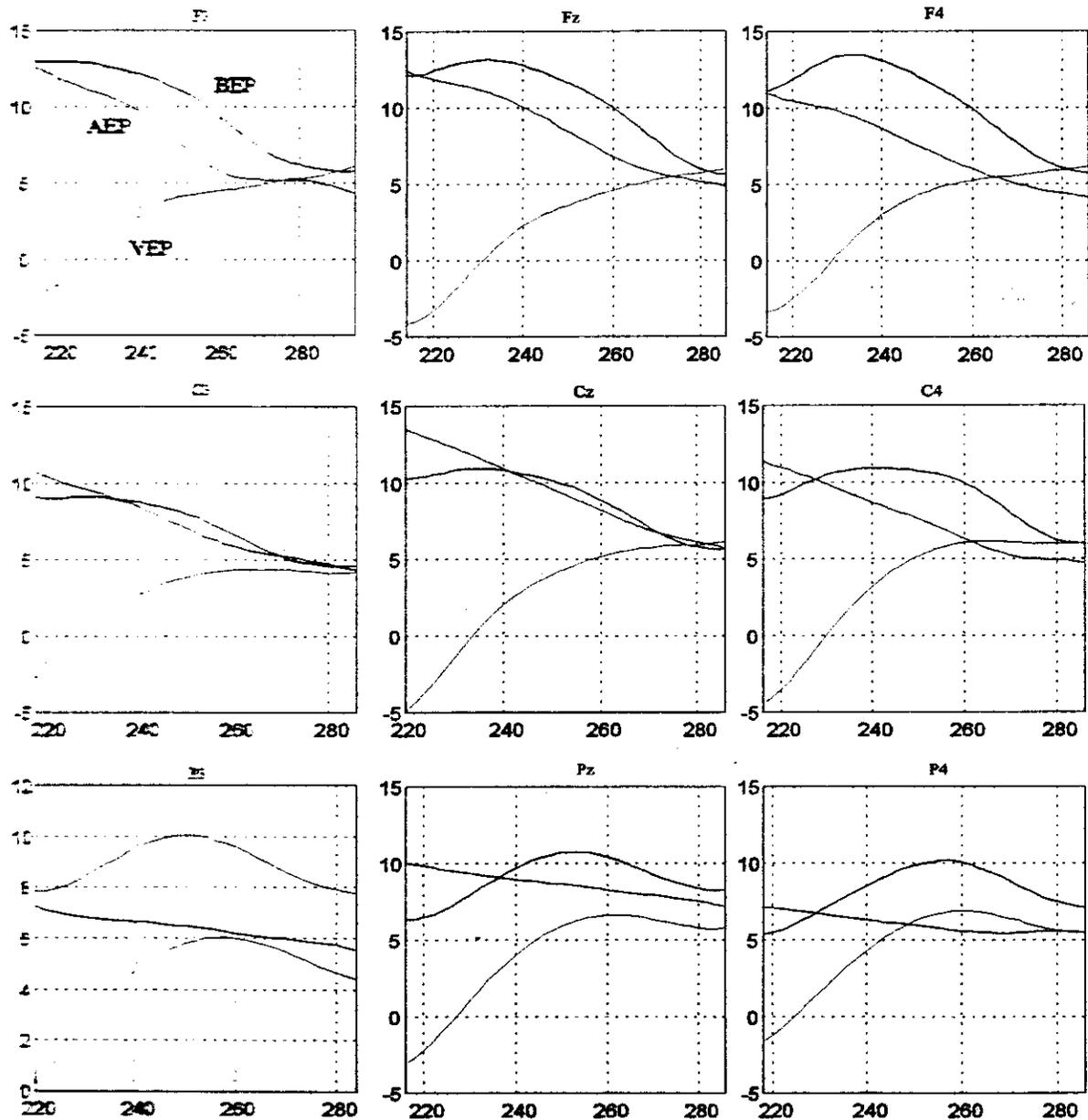


Figura VIII.4.14. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización mientras que la actividad visual corresponde a el proces. de post-categorización.

obtenidos para el electrodo Cz, figura VIII.4.3, parece ser que el fenómeno intersensorial se desarrolla principalmente en la región central.

Las actividades eléctrica unimodales y bimodales para la segunda ventana de análisis se presentan en la figura VIII.4.14. En la figura se observa un retraso en el pico bimodal desde la región frontal hacia la región parietal. Es posible que el corrimiento se relacione a un incremento de la energía de la actividad visual y un decremento de la actividad auditiva. En los electrodos frontales,

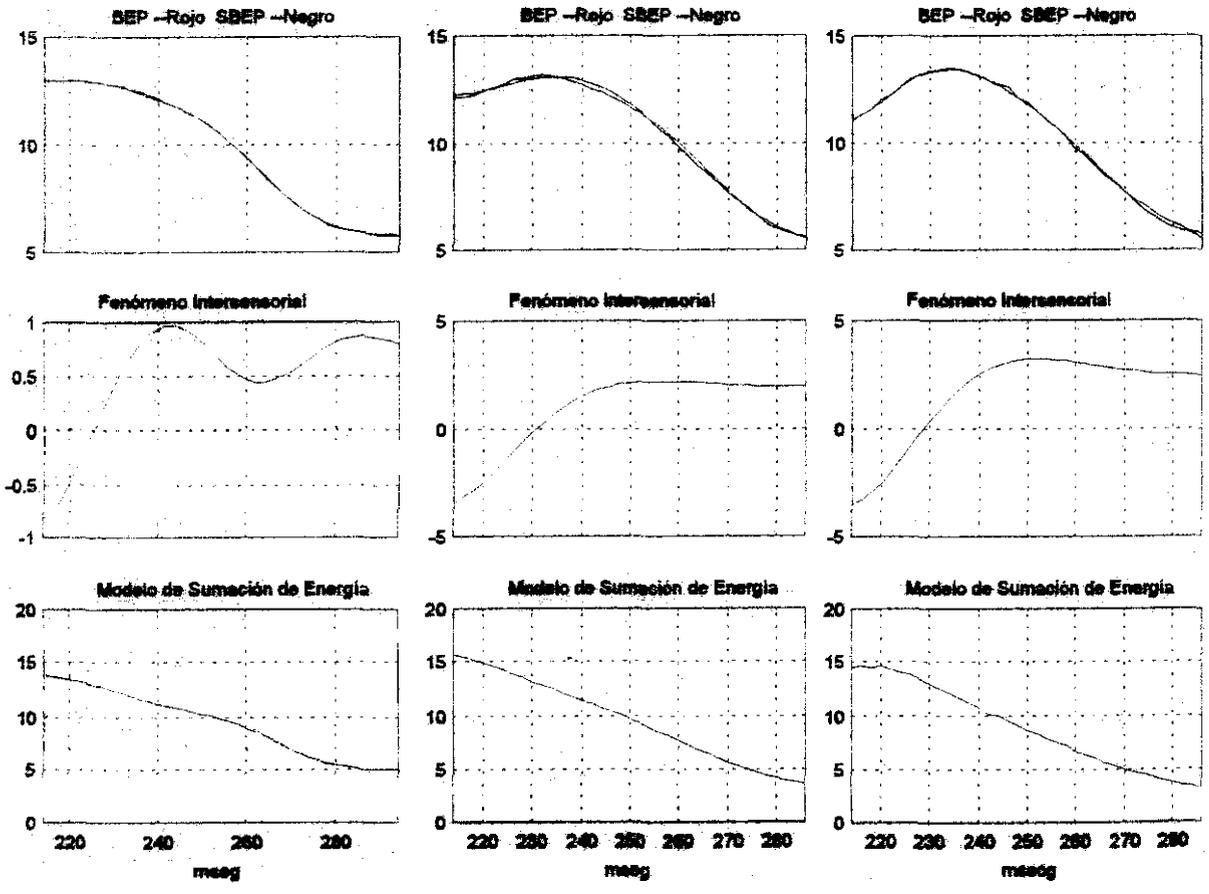


Figura VIII.4.15. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

el potencial bimodal presenta una mayor amplitud en comparación con la amplitud en los electrodos localizados en las regiones central y parietal. Además, en la región frontal la morfología del potencial bimodal se aproxima a la morfología de la actividad auditiva mientras que en la región parietal se aproxima mas a la actividad visual. Es importante señalar que los componentes incluidos en la presente ventana de análisis se asocian con el proceso de categorización del estímulo auditivo y con el proceso de post-categorización del estímulo visual.

Los resultados del modelo no-lineal, figuras VIII.4.15-17, indican que el fenómeno

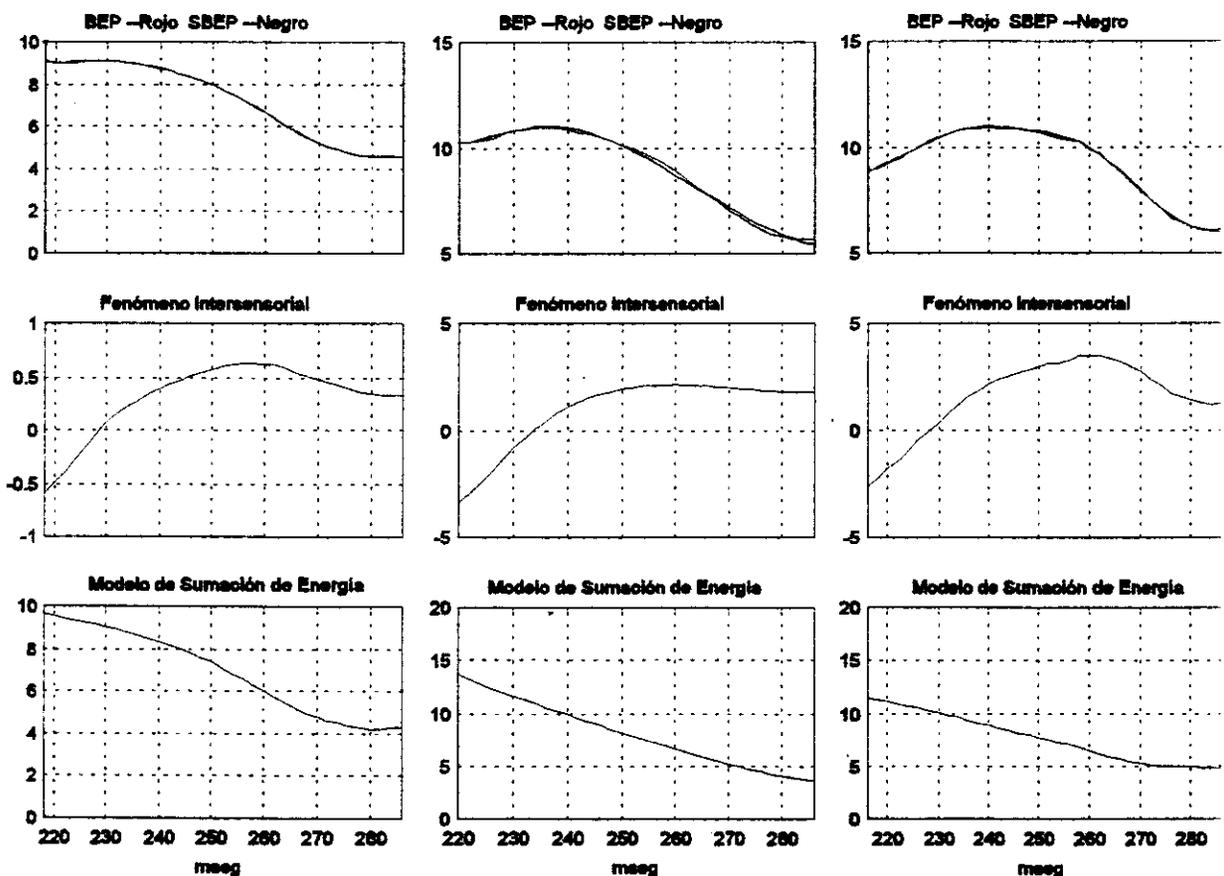


Figura VIII.4.16. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

intersensorial esta presente en una zona amplia del cerebro, con una lateralización hacia el hemisferio derecho prominente en la región parietal. El análisis espacial no-lineal concuerda con lo reportado para el electrodo Cz, el fenómeno intersensorial inicia con una pendiente positiva seguida por una contribución casi constante. Es importante notar que la duración de la pendiente es dependiente del electrodo y probablemente esta relacionada con el incremento del proceso de post-categorización visual. La extensión del fenómeno intersensorial posiblemente es generado por la tarea de detección simultánea de estímulos en las vías sensoriales auditiva y visual asignada al sujeto. En otras palabras,

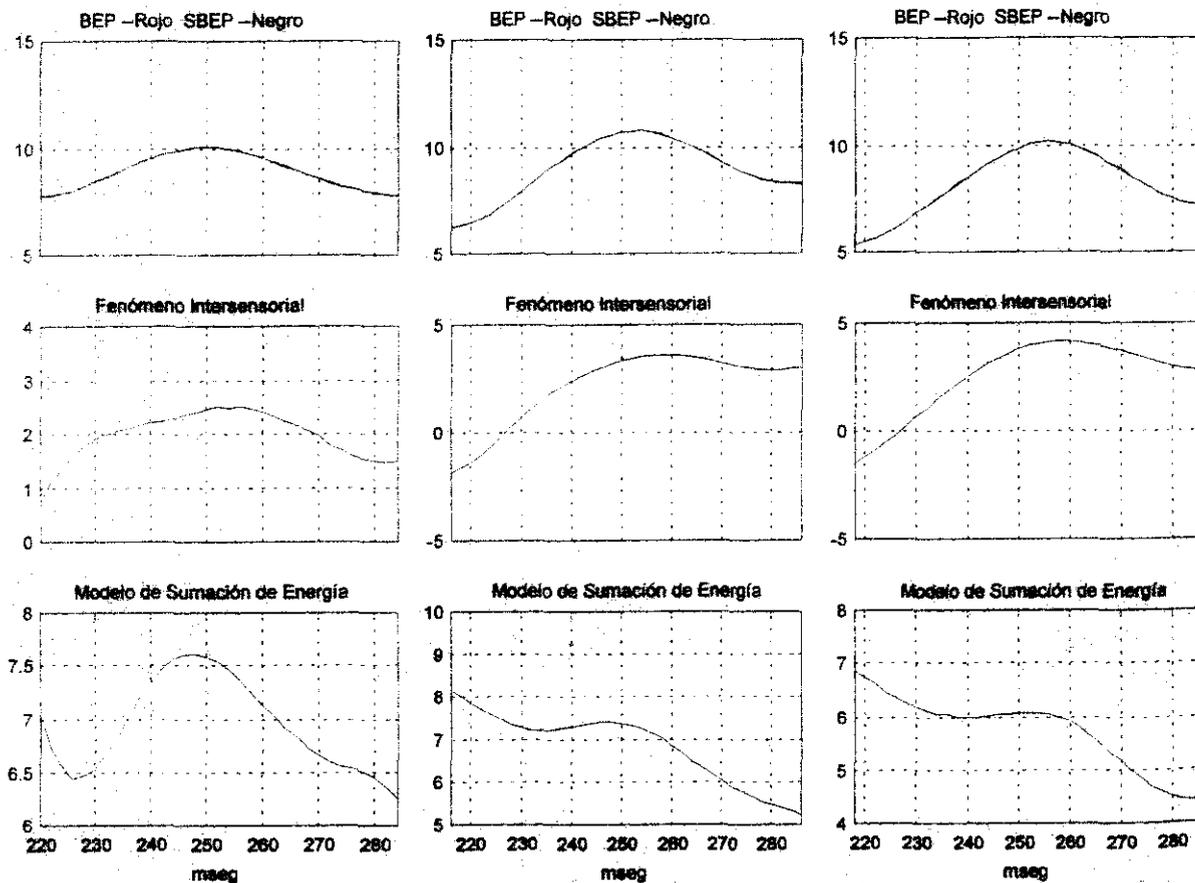


Figura VIII.4.17. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

en la región frontal debido a la reducida actividad visual el fenómeno intersensorial se incrementa para realizar el proceso de categorización del estímulo auditivo, mientras que en la región parietal, en donde la actividad auditiva es reducida, el fenómeno intersensorial también se incrementa. Los coeficientes del modelo se incluyen en la tabla VIII.4.3.

TABLE VIII.4.3
Coefficientes del Modelo No-Linear para la Segunda Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements	Coef.	Elements
+0.959	$u_A(n-10)$	+1.015	$u_A(n-7)$	+0.972	$u_A(n-8)$	+1.137	$u_A(n-7)$
+0.027	$u_A(n-1)u_v(n-1)$	-0.335	$u_v(n-5)$	-0.343	$u_v(n-6)$	-0.029	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
+0.039	$u_A(n-4)u_v(n-2)$	+0.061	$u_A(n-4)u_v(n-1)$	+0.096	$u_A(n-1)u_v(n-1)$	-0.114	$u_A(n-6)u_v(n-1)$
-0.035	$u_A(n-10)u_v(n-3)$			+0.551	$u_A(n-5)u_A(n-8)$	+0.124	$u_A(n-8)u_v(n-1)$
				-0.538	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	+0.231	$u_v(n-1)u_v(n-6)$
						-0.296	$u_v(n-3)u_v(n-4)$

C4		P3		Pz		P4	
+1.086	$u_A(n-2)$	+1.016	$u_A(n-1)$	+1.115	$u_A(n-1)$	-0.653	$u_A(n-1)$
-0.085	$u_A(n-8)$	-0.054	$u_A(n-1)u_v(n-1)$	-0.062	$u_A(n-1)u_A(n-13)$	+0.601	$u_A(n-15)$
-0.863	$u_A(n-1)u_v(n-2)$	+0.176	$u_A(n-3)u_A(n-12)$	-0.105	$u_A(n-1)u_v(n-1)$	-0.026	$u_A(n-1)u_v(n-2)$
+0.792	$u_A(n-2)u_v(n-2)$	+0.168	$u_A(n-5)u_A(n-13)$	+0.037	$u_A(n-3)u_A(n-4)$	+0.119	$u_A(n-3)u_A(n-6)$
-0.039	$u_A(n-5)u_v(n-1)$	-0.155	$u_A(n-9)u_A(n-13)$	+0.153	$u_A(n-6)u_v(n-1)$	+0.113	$u_A(n-15)u_v(n-2)$
+0.135	$u_A(n-8)u_v(n-1)$	+0.303	$u_A(n-9)u_v(n-1)$	-0.246	$u_A(n-13)u_A(n-1)$	+0.031	$u_v(n-1)u_v(n-2)$
		-0.158	$u_A(n-11)u_A(n-12)$	+0.251	$u_A(n-15)u_v(n-1)$		
		-0.187	$u_A(n-13)u_v(n-2)$	-0.027	$u_v(n-11)u_v(n-12)$		

La actividad eléctrica de la tercera ventana de análisis se muestra en la figura VIII.4.18. Esta

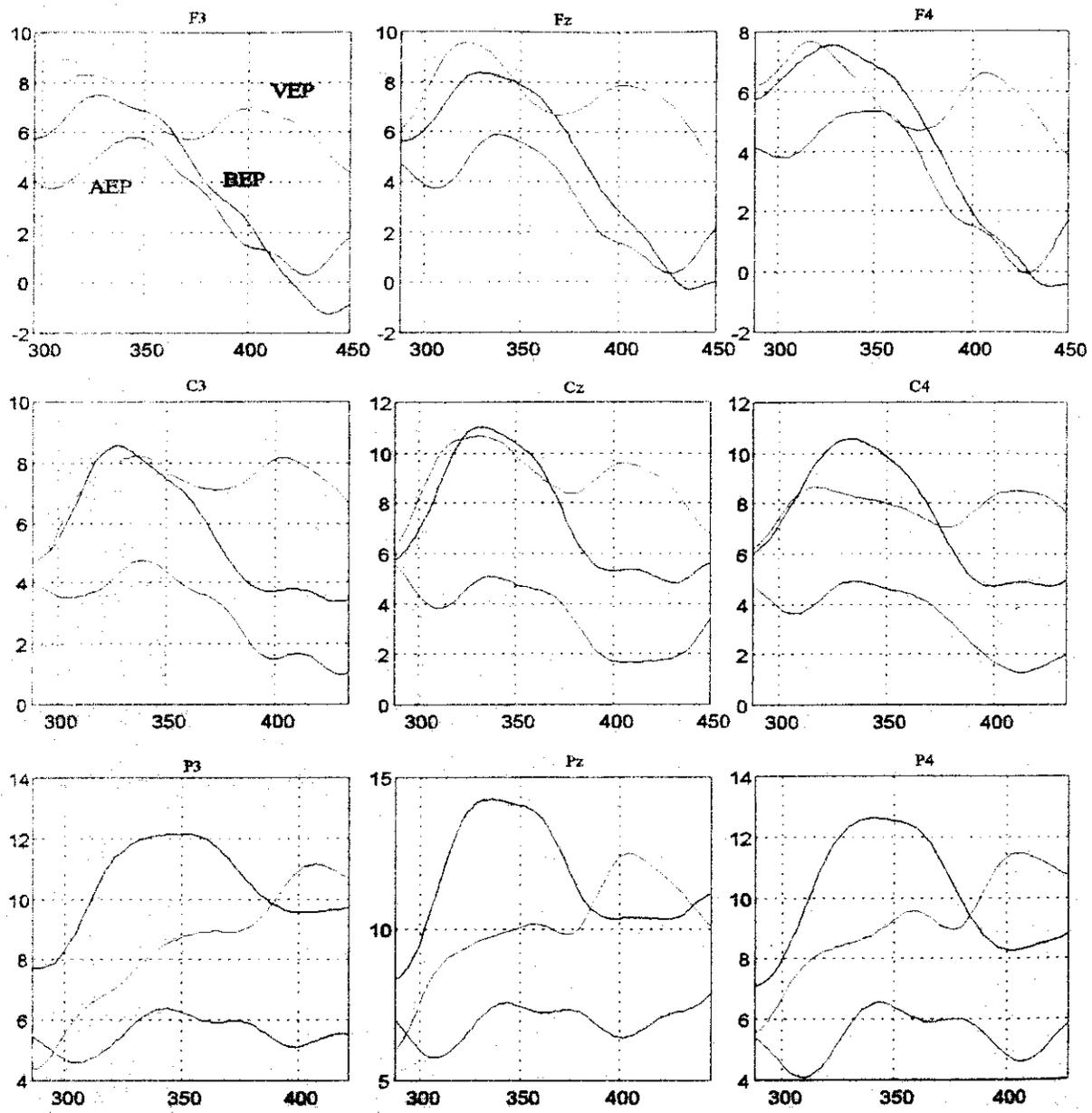


Figura VIII.4.18. Ventanas de tiempo. Se muestra el potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP).

ventana de análisis incluye los componentes P300a y P300b visuales así como los componentes auditivos N200 y P300a, es decir, esta ventana de análisis incluye el proceso de decisión o cierre visual, el final del proceso de categorización auditiva, el inicio del proceso de cierre de decisión

auditivo así como el componente bimodal P300. La morfología de la actividad bimodal se aproxima en la región frontal a la morfología de la actividad auditiva mientras que en la región central se

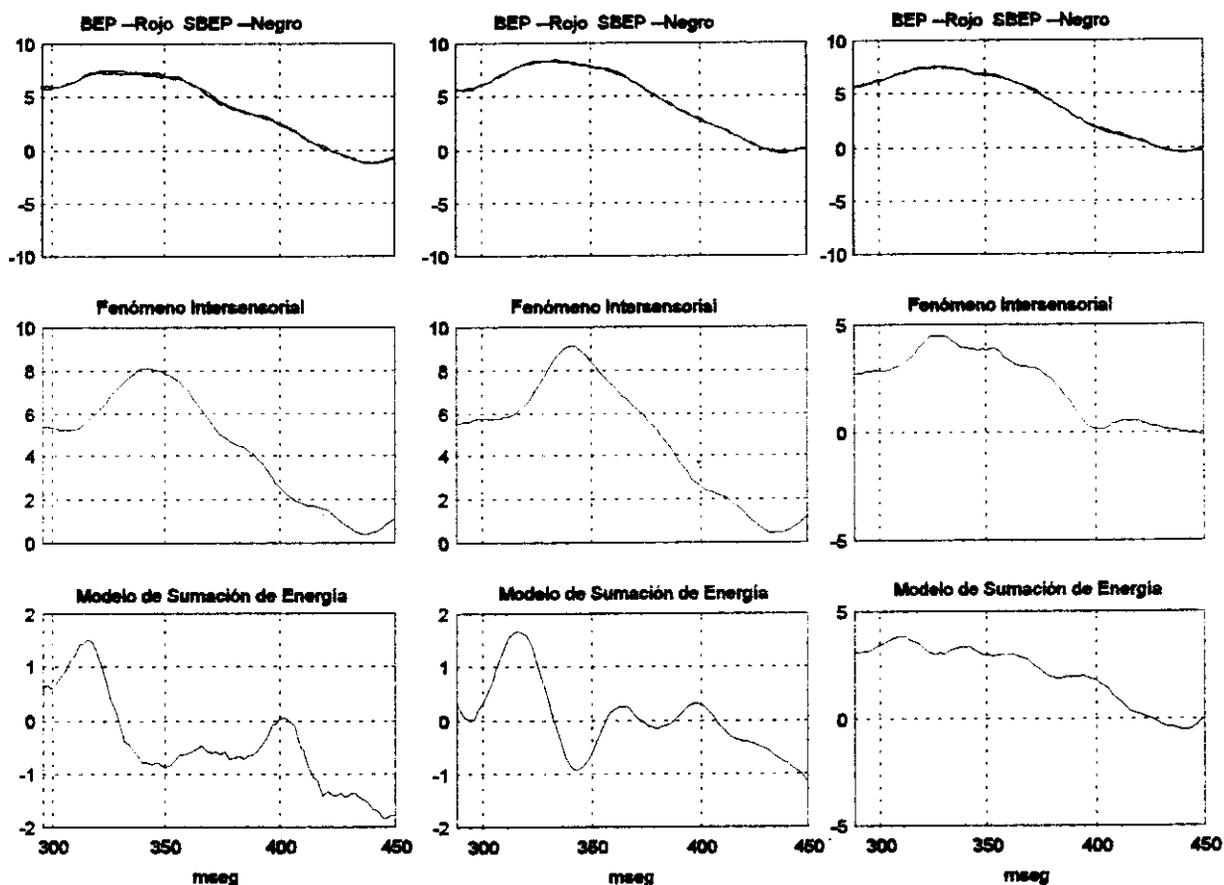


Figura VIII.4.19. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

aproxima en mayor medida a la actividad visual. En la región parietal, la morfología de la actividad bimodal se desvía tanto de la actividad visual como de la auditiva.

Los resultados del modelo no-lineal, figuras VIII.4.19-21, indican una actividad intersensorial importante para explicar la generación de la actividad cognoscitiva bimodal. El fenómeno

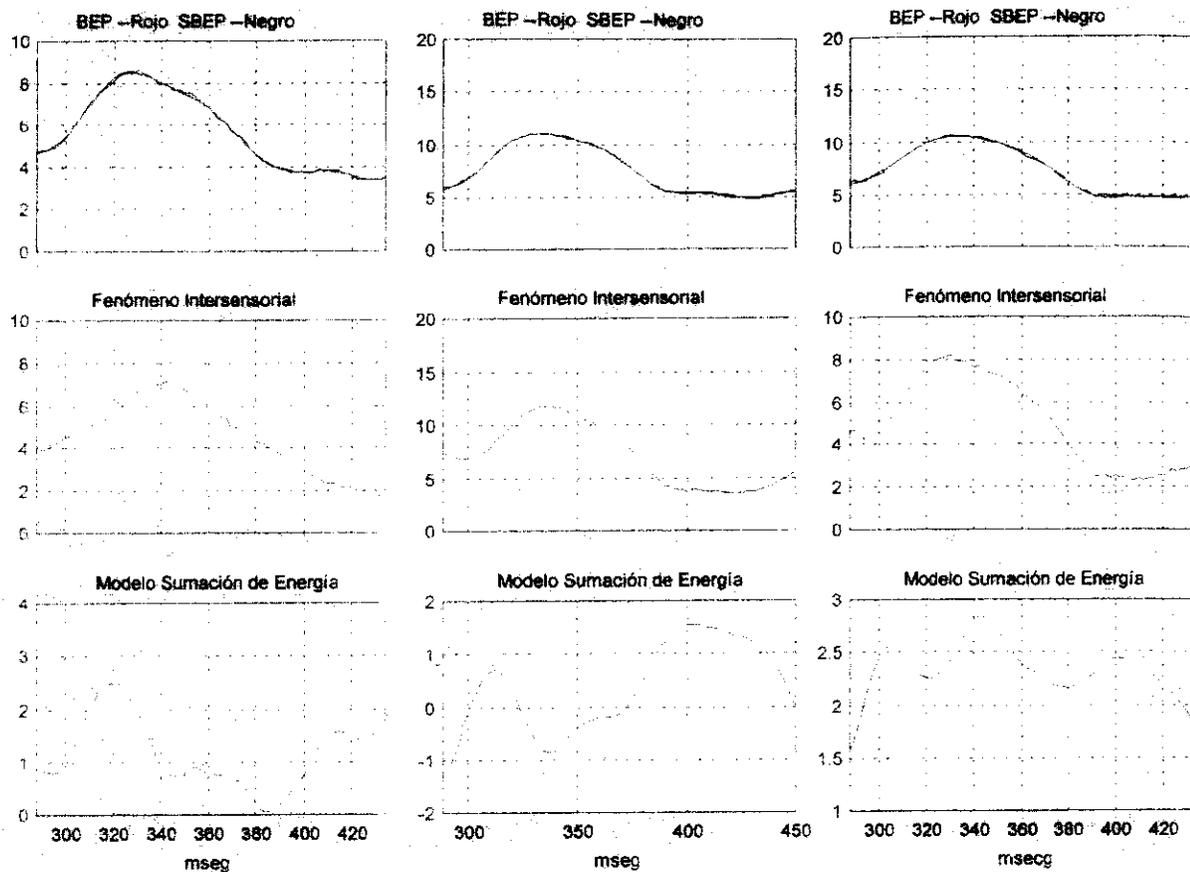


Figura VIII.4.20. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

intersensorial se extiende sobre una región importante del cerebro, pero es evidente que su actividad es prominente en el vértex y ligeramente lateralizado hacia la izquierda. Es importante observar que la contribución del fenómeno intersensorial es predominante en relación con la actividad generada por el modelo de sumación de energías. El análisis no-lineal espacial concuerda con los resultados discutidos para el electrodo Cz. La información cognoscitiva auditiva representada por el componente P300a posiblemente refuerza el proceso cognoscitivo visual para decidir que se presentó la combinación de estímulos relevante. Los coeficientes del modelo NARX para la tercera ventana de

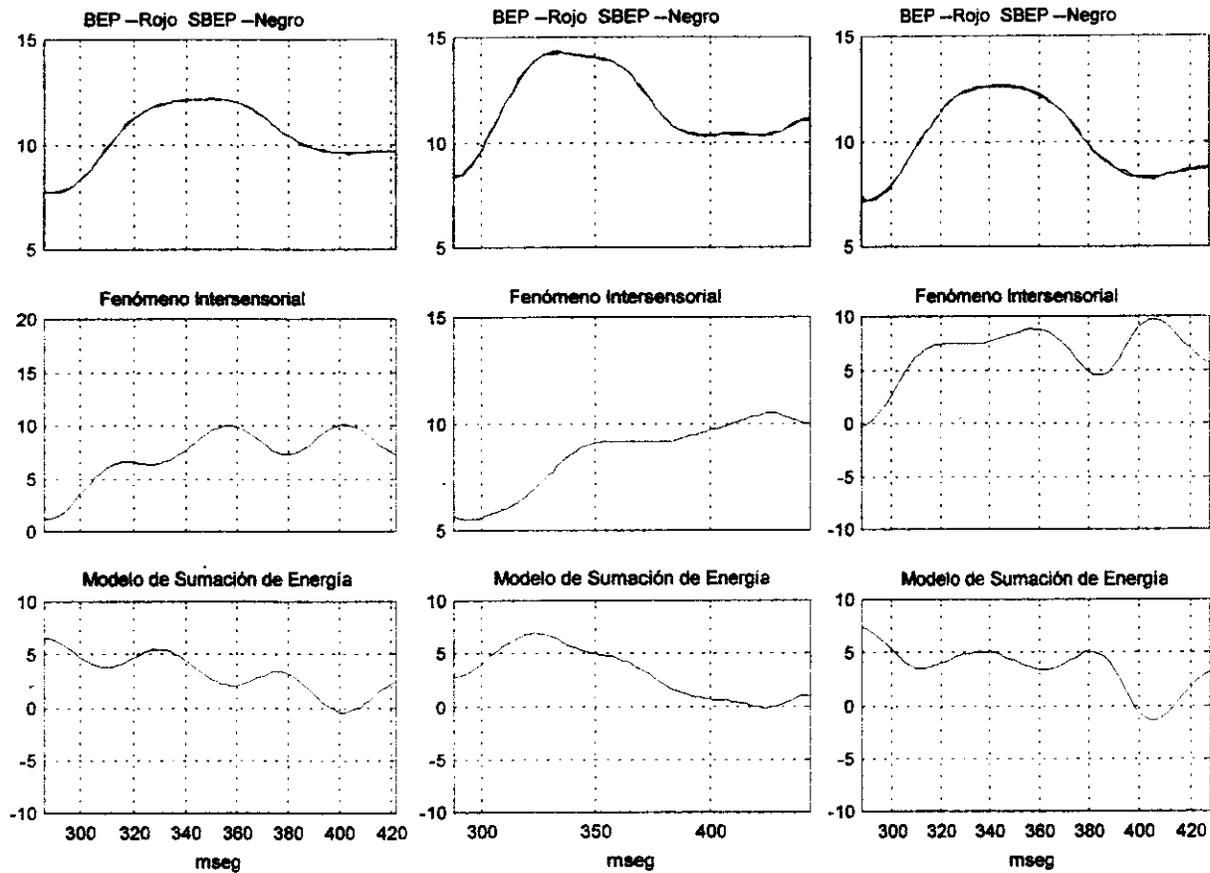


Figura VIII.4.21. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

análisis se reportan en la tabla VIII.4.4.

Los tiempos de reacción para la estimulación unimodal y bimodal se presentan en la tabla VII.4.1. El tiempo de reacción promedio bimodal, con cero milisegundos de retraso entre estímulos, es más rápido que cualquiera de los tiempos de reacción unimodales. Una posible explicación puede estar relacionada con la contribución del fenómeno intersensorial obtenida por el modelo no-lineal que sugiere una generación más rápida del proceso cognoscitivo bimodal.

TABLE VIII.4.4
Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Tercera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
-0.431	$u_A(n-2)$	-0.581	$u_V(n-7)$	+0.115	$u_A(n)u_A(n-2)$	+0.796	$u_V(n-1)$
+0.118	$u_A(n-1)u_A(n-9)$	-0.482	$u_A(n-1)u_A(n-10)$	+0.731	$u_A(n-2)u_V(n-7)$	+0.450	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
+0.130	$u_A(n-4)u_V(n-1)$	+0.553	$u_A(n-1)u_A(n-12)$	-0.737	$u_A(n-2)u_V(n-10)$	+0.664	$u_A(n-1)u_V(n-1)$
+0.061	$u_A(n-6)u_V(n-11)$	-0.057	$u_A(n-5)u_A(n-6)$	+0.133	$u_A(n-4)u_V(n-1)$	-0.792	$u_A(n-2)u_V(n-2)$
+0.585	$u_V(n-6)u_V(n-7)$	+0.147	$u_A(n-5)u_V(n-1)$	+0.093	$u_A(n-13)u_V(n-15)$	-0.722	$u_A(n-3)u_A(n-5)$
-1.243	$u_V(n-7)u_V(n-12)$	+0.032	$u_A(n-5)u_V(n-12)$	-0.325	$u_A(n-15)u_V(n-4)$	+0.263	$u_A(n-5)u_A(n-7)$
+0.637	$u_V(n-11)u_V(n-12)$	+0.092	$u_V(n-2)u_V(n-3)$	+0.227	$u_A(n-15)u_V(n-10)$	+0.323	$u_A(n-5)u_V(n-3)$
		-0.100	$u_V(n-3)u_V(n-12)$	+0.545	$u_V(n-1)u_V(n-10)$	-0.257	$u_V(n-1)u_V(n-12)$
		+0.078	$u_V(n-11)u_V(n-12)$	-0.501	$u_V(n-3)u_V(n-10)$	+0.171	$u_V(n-8)u_V(n-10)$
				-0.021	$u_V(n-7)u_V(n-8)$		

TABLE VIII.4.4. (Cont.)

C4		P3		Pz		P4	
-0.154	$u_V(n-5)$	+1.041	$u_A(n-1)$	+1.443	$u_A(n-2)$	-0.343	$u_A(n-1)$
-0.172	$u_A(n-1)u_A(n-9)$	+1.150	$u_A(n-2)$	+2.948	$u_V(n-3)$	+2.147	$u_V(n-5)$
+1.017	$u_A(n-1)u_V(n-3)$	+0.872	$u_V(n-14)$	-0.335	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.302	$u_A(n-1)u_V(n-20)$
-1.016	$u_A(n-2)u_V(n-3)$	-0.330	$u_A(n-4)u_A(n-10)$	+0.386	$u_A(n-1)u_A(n-19)$	+0.077	$u_A(n-2)u_V(n-1)$
+0.196	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	+0.074	$u_A(n-7)u_A(n-8)$	+0.109	$u_A(n-4)u_V(n-4)$	+0.048	$u_A(n-3)u_A(n-6)$
+0.468	$u_A(n-8)u_V(n-8)$	+0.190	$u_A(n-9)u_V(n-12)$	-0.301	$u_A(n-19)u_A(n-20)$	-0.611	$u_A(n-3)u_V(n-17)$
-0.278	$u_A(n-10)u_V(n-12)$	+0.073	$u_A(n-12)u_V(n-18)$	+0.017	$u_A(n-20)u_V(n-17)$	+0.384	$u_A(n-4)u_V(n-4)$
+0.049	$u_V(n-2)u_V(n-3)$	-0.015	$u_A(n-18)u_V(n-1)$	-0.157	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	-0.641	$u_A(n-20)u_V(n-10)$
		+0.031	$u_A(n-19)u_V(n-14)$	-0.082	$u_V(n-8)u_V(n-18)$	-0.088	$u_V(n-2)u_V(n-3)$
		+0.294	$u_A(n-21)u_V(n-1)$			-0.048	$u_V(n-2)u_V(n-17)$
		-0.405	$u_V(n-21)u_V(n-15)$			-0.219	$u_V(n-5)u_V(n-20)$
		-0.034	$u_A(n-22)u_V(n-15)$			+0.174	$u_V(n-16)u_V(n-18)$
		-0.101	$u_V(n-1)u_V(n-2)$				

VIII.4.4. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal Utilizando un Retraso entre Estimulación Auditiva y Visual.

En los párrafos siguientes se analiza el fenómeno intersensorial cuando existe un retraso entre la presentación del estímulo visual y el auditivo. Los resultados del análisis no-lineal se comparan con los obtenidos por estimulación simultánea. El análisis se realiza para el electrodo Pz involucrando un retraso de 80 milisegundos del inicio del estímulo auditivo con respecto del inicio del estímulo visual, figuras VIII.4.22(a)-(b). En las figuras VIII.4.1(a) y VIII.4.22(b) puede apreciarse el retraso de 80 milisegundos que sufre la actividad bimodal y auditiva en comparación con la actividad bimodal y auditiva en estimulación simultánea.

Parece ser que debido a la actividad auditiva predominante y posiblemente al fenómeno de

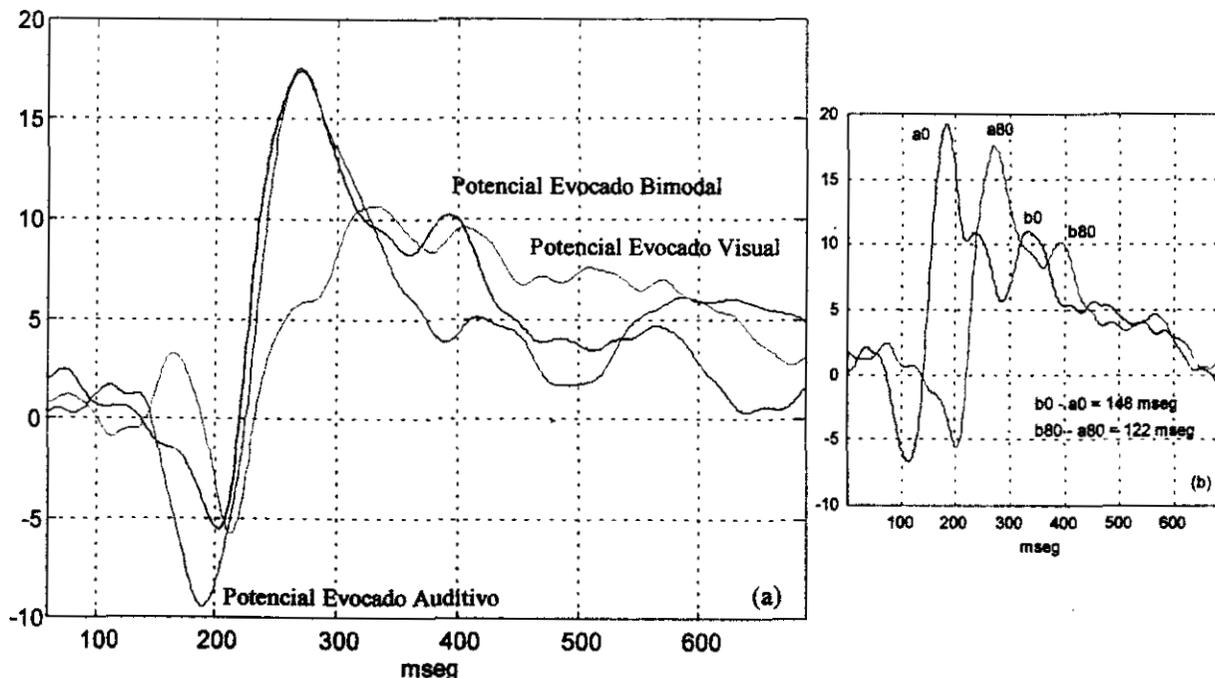


Figura VIII.4.22. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, el potencial bimodal se adquirió con un retraso entre estímulos de 80 msec, (b) potenciales evocados bimodales obtenidos por estimulación simultánea y con 80 msec de retraso.

sumación de energías, la morfología bimodal en la figura VIII.4.22 (a) sigue el corrimiento que sufre la información auditiva y se aproxima a su morfología. En el segmento de actividad bimodal cognoscitiva posterior al componente P200, el primer pico positivo bien definido obtenido por estimulación simultánea es fusionado con el componente P200 al utilizar estimulación con retraso y se observa como una pequeña protuberancia. De hecho existe una diferencia de 100 milisegundos entre estas actividades eléctricas. El segundo pico cognoscitivo bimodal se encuentra definido a los 332 milisegundos en estimulación simultánea en comparación a los 392 milisegundos en estimulación

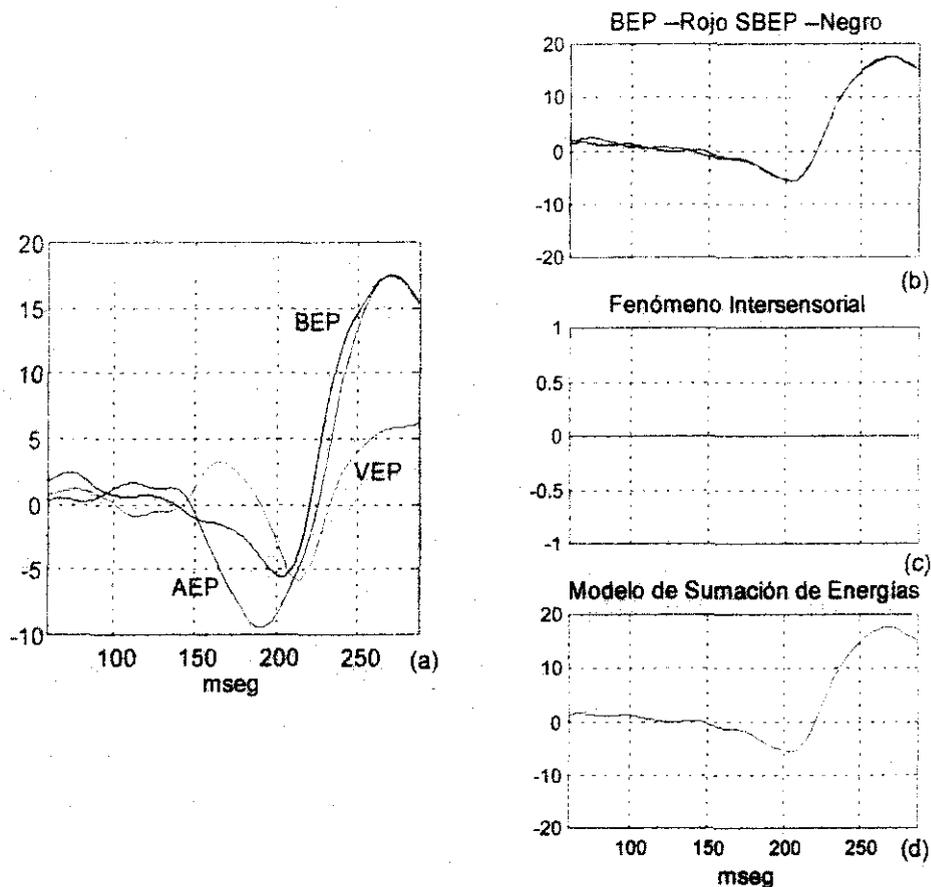


Figura VIII.4.23. Modelo no-lineal. (a) Potenciales evocados auditivo (AEP), visual (VEP) y bimodal (BEP) para la condición de estimulación con retraso de 80 mseg en el electrodo Pz, (b) potenciales evocados bimodales adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías sensoriales visual y auditiva, (d) suma de las contribuciones lineales y del fenómeno intrasensorial.

con retraso.

De acuerdo con el procedimiento de segmentación propuesto en el primer experimento, la primera ventana de análisis se define de los 60 a los 288 milisegundos, figura VIII.4.23(a). El potencial bimodal adquirido se desvía tanto de la actividad visual como auditiva alrededor de los 175 milisegundos. Sin embargo, los resultados del modelo no-lineal indican que la actividad eléctrica bimodal puede generarse mediante un modelo de sumación de energías, figuras VIII.4.23(b)-(d). A

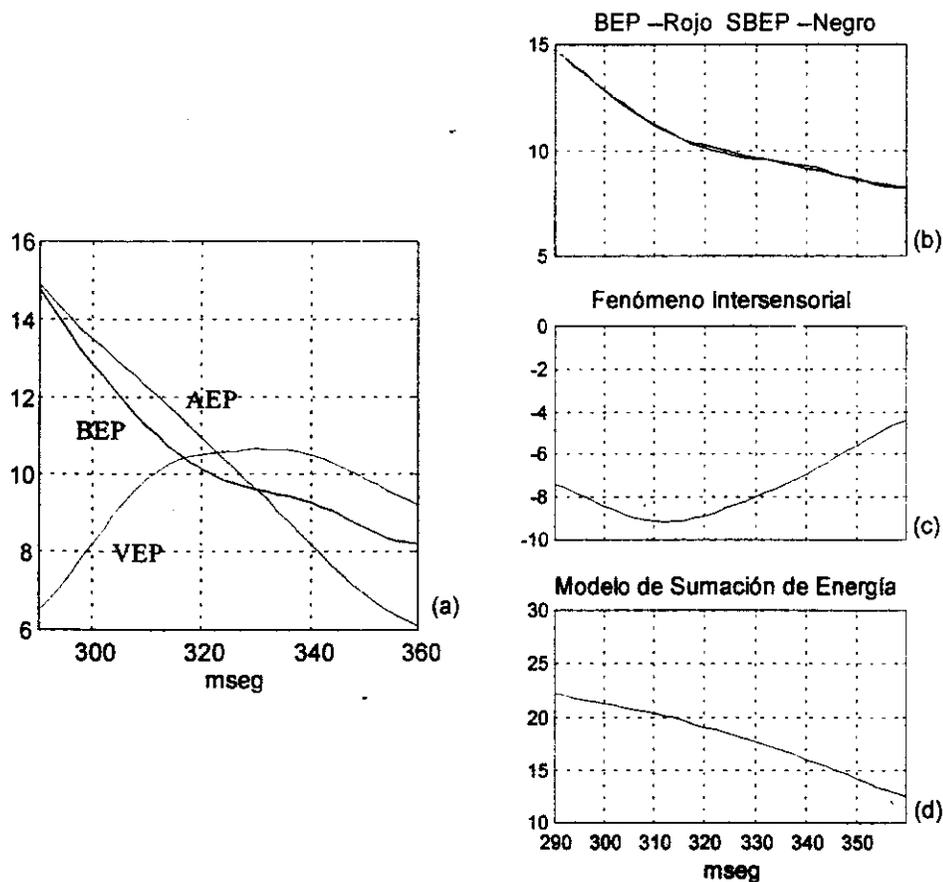


Figura VIII.4.24. Modelo no-lineal. (a) Potenciales evocados auditivo (AEP), visual (VEP) y bimodal (BEP) para la condición de estimulación con retraso de 80 msec en el electrodo Pz, (b) potenciales evocados bimodales adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías sensoriales visual y auditiva, (d) suma de las contribuciones lineales y del fenómeno intrasensorial.

La tercera ventana de tiempo definida de los 367 a los 368 milisegundos incluye la actividad

información cognoscitiva parcial del estímulo visual.

de decisión, utilizando la información del análisis de las características del estímulo auditivo e decrementa. Parece ser que al final de esta ventana de análisis se efectúa la preparación del proceso cuando la información visual cognoscitiva alcanza su máximo el fenómeno intersensorial se el fenómeno intersensorial, este incremento se observa en los 367 milisegundos. Posteriormente, de características del estímulo. Conforme la información de las características prominentes se encuentra en la transición entre las fases de actividad cognoscitiva generada por el análisis relaciona con el hecho de que la actividad cognoscitiva visual y auditiva en las ventanas que la actividad auditiva revelan un importante fenómeno intersensorial. Una posible interpretación, figura VIII.4.24(c), se estímulo visual, figura VIII.4.24(a). Los resultados de los análisis de las características del estímulo de estimulación simultánea, muestra la concurrencia de la actividad cognoscitiva en forma parcial y de la ventana de tiempo en donde se lleva a cabo el análisis de las características de los estímulos en el caso La segunda ventana de tiempo definida de los 257 a los 258 milisegundos, considerada como

visual.

componentes exógenos auditivos y visuales y positivamente el modelo de sumación de energías. Es importante que la primera ventana incluye estimulación visual, el potencial evocado puede existir en la ventana de tiempo en donde se lleva a cabo el análisis de las características del estímulo. En consecuencia, se puede explicar mediante el modelo de sumación de energías.

cognoscitiva bimodal y se observa claramente su corrimiento en latencia con respecto de la actividad cognoscitiva visual, figura VIII.4.25.(a). Parece ser que retrasando el inicio del estímulo auditivo se refleja en un corrimiento de la actividad bimodal y una generación más rápida de la onda cognoscitiva. La figura VIII.4.22(a) muestra que la información cognoscitiva visual se genera primero, implicando que posiblemente el sujeto esta esperando algún proceso cognoscitivo auditivo para decidir si se trata de la combinación correcta de estímulos. Los resultados del modelo, figura VIII.4.25(b)-(d) indican que es necesario información cognoscitiva intersensorial para explicar la dinámica de la actividad

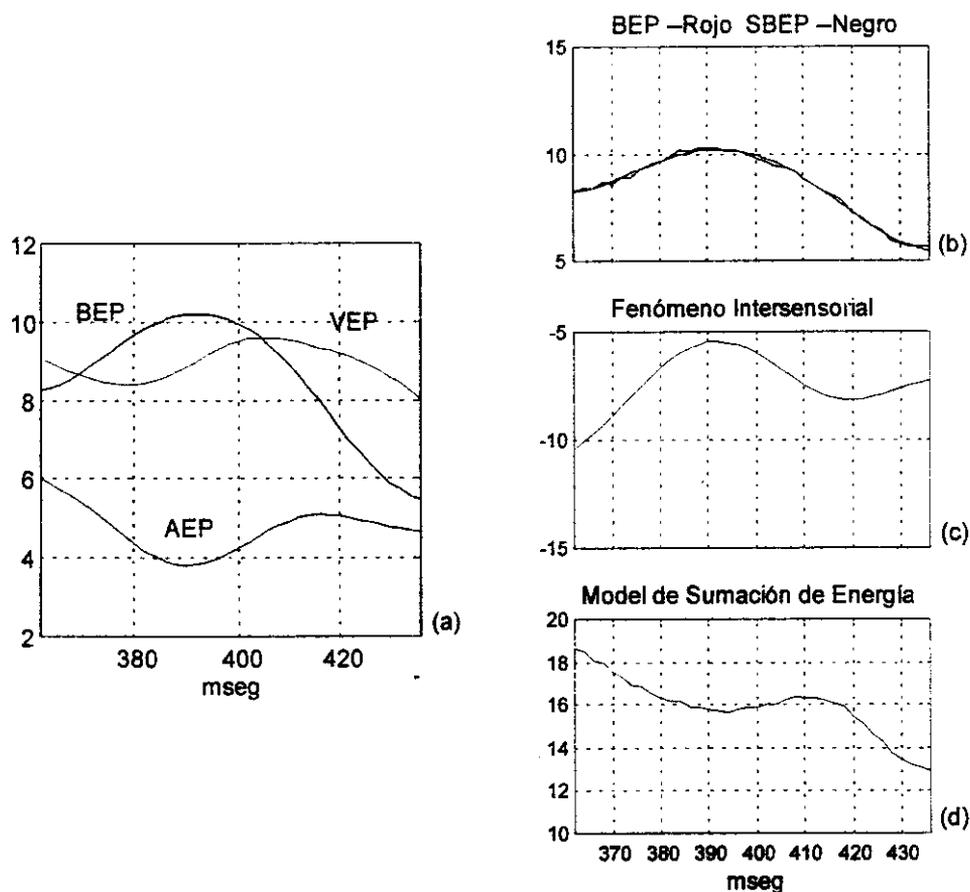


Figura VIII.4.25. Modelo no-lineal: (a) Potenciales evocados auditivo (AEP), visual (VEP) y bimodal (BEP) para la condición de estimulación con retraso de 80 mseg en el electrodo Pz, (b) potenciales evocados bimodales adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías sensoriales visual y auditiva, (d) suma de las contribuciones lineales y del fenómeno intrasensorial.

eléctrica bimodal. Los retrasos incluidos por el modelo SARKA, uno de los términos es retrasado 11 muestras, parecen implicar que procesos de memoria son incluidos para generar la decisión de la validez del estímulo. De hecho, el retraso incluido por el modelo es sobre la información de la vía visual.

es
ca
ac
De
no
VI
20
15
10
5
0
-5
-10

Figura
mod

VIII.5. Experimento # 4

Como en el tercer experimento, el cuarto experimento establece una relación entre los estímulos utilizados en el paradigma, el sujeto necesita responder a una combinación específica de la información visual y auditiva. Sin embargo, en contraste con el tercer experimento, la discriminabilidad entre los estímulos se decrementa al utilizar dos tonos con frecuencias más cercanas y dos colores más cercanos. La figura VIII.5.1(a) muestra los potenciales unimodales y bimodal adquiridos en el electrodo Cz, la actividad eléctrica se muestra en un rango de 60 a 760 milisegundos. De la figura VIII.5.1(a) puede observarse que tanto la información visual y auditiva influyen en la morfología del potencial bimodal, situación similar al tercer experimento. El modelo lineal, figura VIII.5.1(b), revela que algunos procesos más complejos se involucran en la génesis del potencial

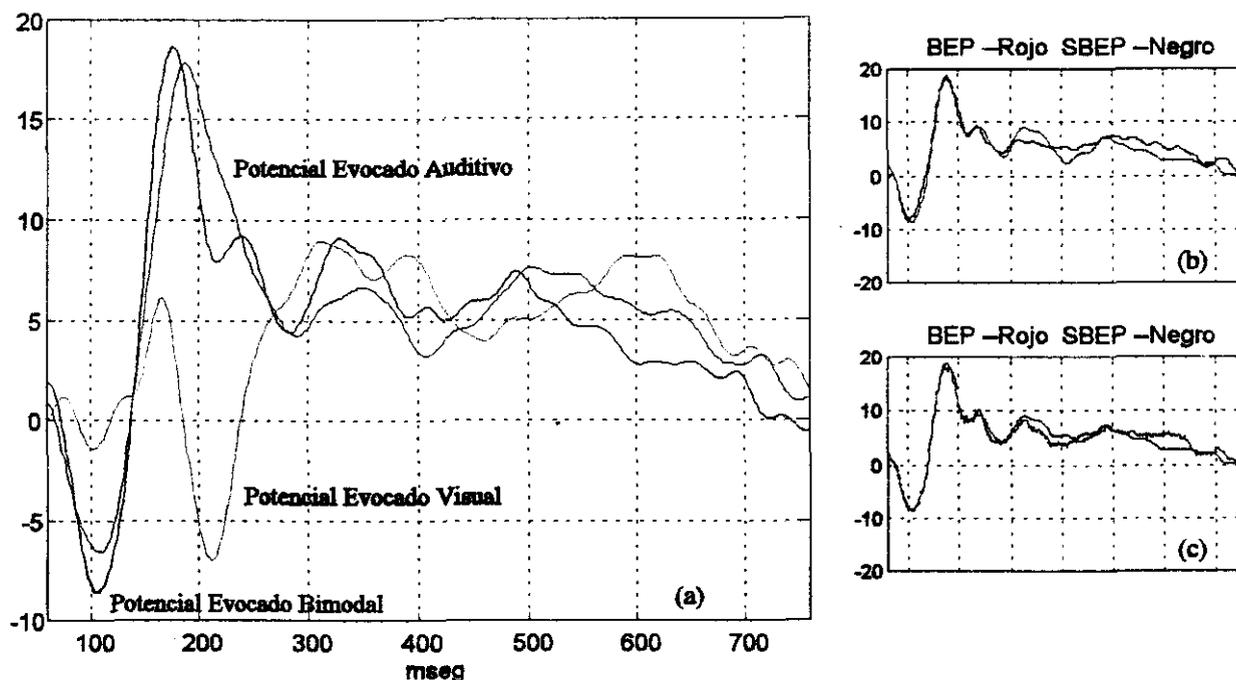


Figura VIII.5.1. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

evocado bimodal debido a que el modelo no puede seguir la morfología de la señal adquirida. El modelo no-lineal de la figura VIII.5.1(c) mejora el ajuste entre la señal adquirida y la señal sintetizada sin embargo, como en los experimentos anteriores es necesario efectuar el análisis no-lineal segmentando las actividades unimodales y bimodal.

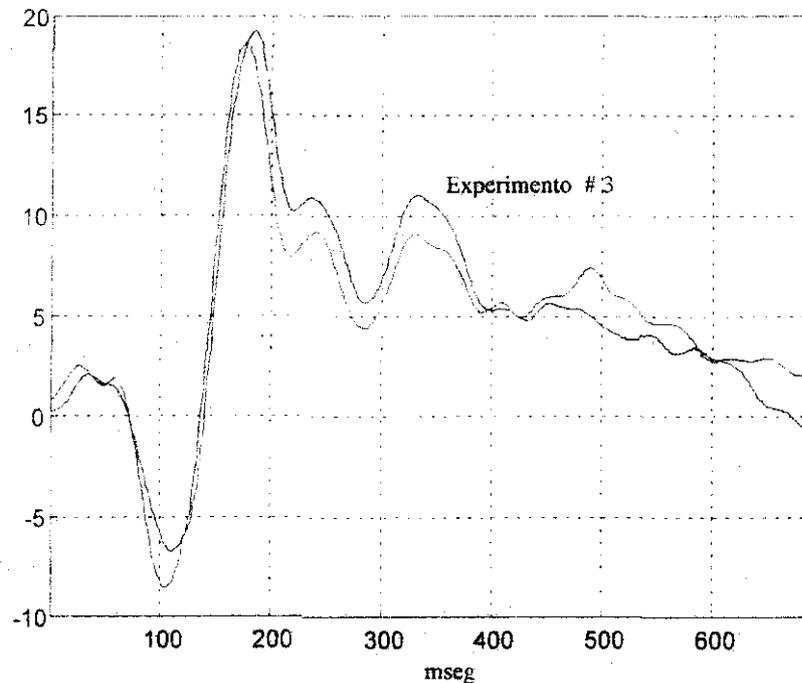


Figura VIII.5.2. Potenciales evocados bimodales obtenidos en el tercer y cuarto experimento.

Con el propósito de comparar los resultados del tercer y cuarto experimento, en la figura VIII.5.2 se incluyen las actividades eléctricas de los potenciales evocados bimodales para la combinación "target". Es evidente que existen cambios en amplitud y latencia de los componentes bimodales N100 y P200. Parece ser que los procesos de detección y categorización de los estímulos se modifican por la disminución en la discriminabilidad de los estímulos utilizados en el paradigma.

La actividad bimodal asociada con la interacción del proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual parece tener un corrimiento en latencia entre experimentos y un decremento significativo en la amplitud para el cuarto experimento. Los procesos de decisión o cierre, indexados por el componente P300, también presentan cambios de amplitud entre experimentos. Se ha reportado que una amplitud mayor de los componentes cognoscitivos se asocia con un incremento en la exactitud en la detección del estímulo relevante y con una mayor confianza en la decisión. En consecuencia, el cuarto experimento parece ser más difícil y complejo que el tercer experimento.

VIII.5.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz

El modelo no-lineal propuesto, primeramente se realizará para el electrodo Cz y posteriormente se realiza el análisis espacial de la contribución no-lineal. Para este experimento, en el análisis no-lineal únicamente se incluyen las gráficas correspondientes al modelo de sumación de energías y al fenómeno intersensorial.

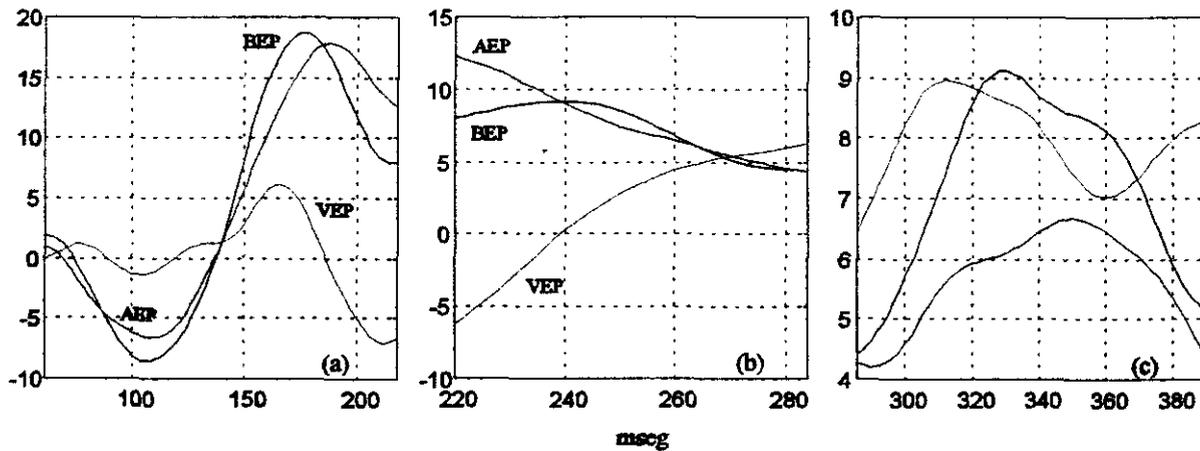
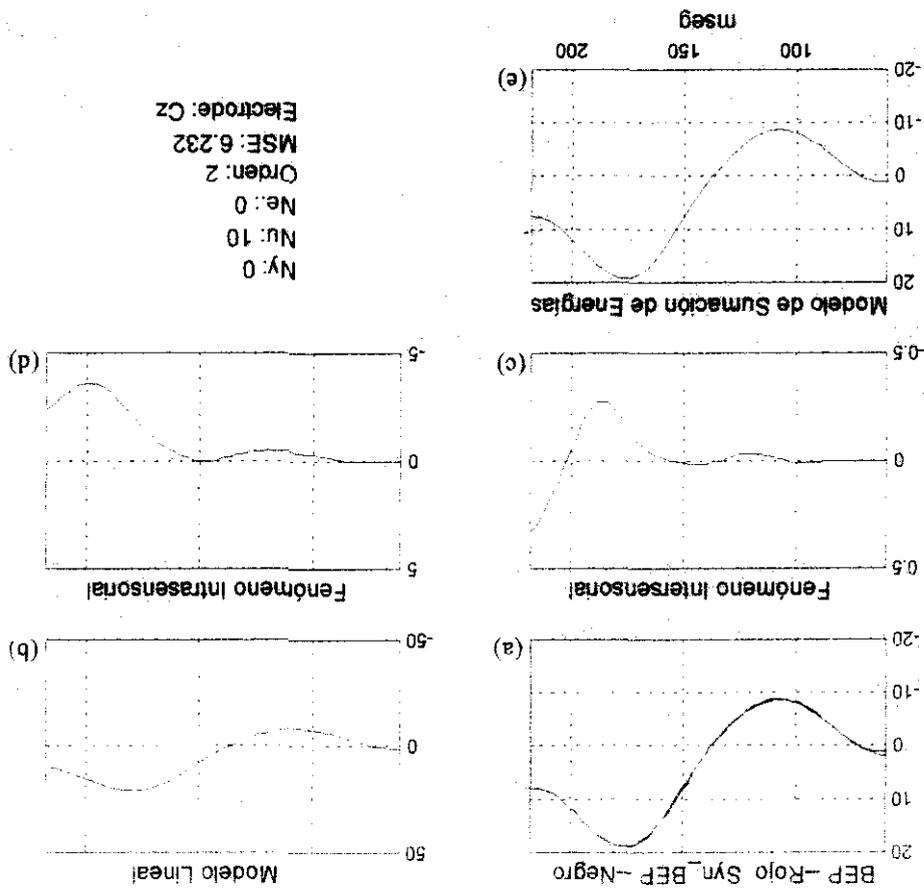


Figura VIII.5.3. Ventanas de tiempo. Se muestra el potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP).

Figura VIII.5.4. Modelo no-lineal. (a) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.



De acuerdo al criterio de segmentación propuesto, la información bimodal puede dividirse en tres ventanas de análisis. La primera ventana de tiempo, figura VIII.5.3(a), inicia en los 60 milisegundos y termina en los 218 milisegundos. Esta ventana contiene los componentes N100 y P200 auditivo y visual así como el componente N200 visual. El potencial evocado bimodal muestra ciertas similitudes con el potencial evocado auditivo, sin embargo, existen algunas desviaciones en pendiente y latencia, principalmente en el componente bimodal P200. Los resultados del modelo no-lineal, mostrado en la figura VIII.5.4(a)-(e), muestran un comportamiento predominante del modelo

de sumación de energías, con la contribución intrasensorial originada completamente por la actividad de la vía sensorial auditiva, como puede corroborarse en la Tabla VIII.5.1. La pequeña contribución del fenómeno intersensorial se incrementa hacia el final de la ventana y es coincidente con el componente bimodal P200. En consecuencia, la información bimodal puede obtenerse esencialmente por el modelo de sumación de energías. El comportamiento no-lineal para el tercer y cuarto experimento sugiere que para el tercer experimento existe una mayor contribución no-lineal. Lo anterior podría ser la explicación de que los componentes N100 y P200 del tercer experimento se

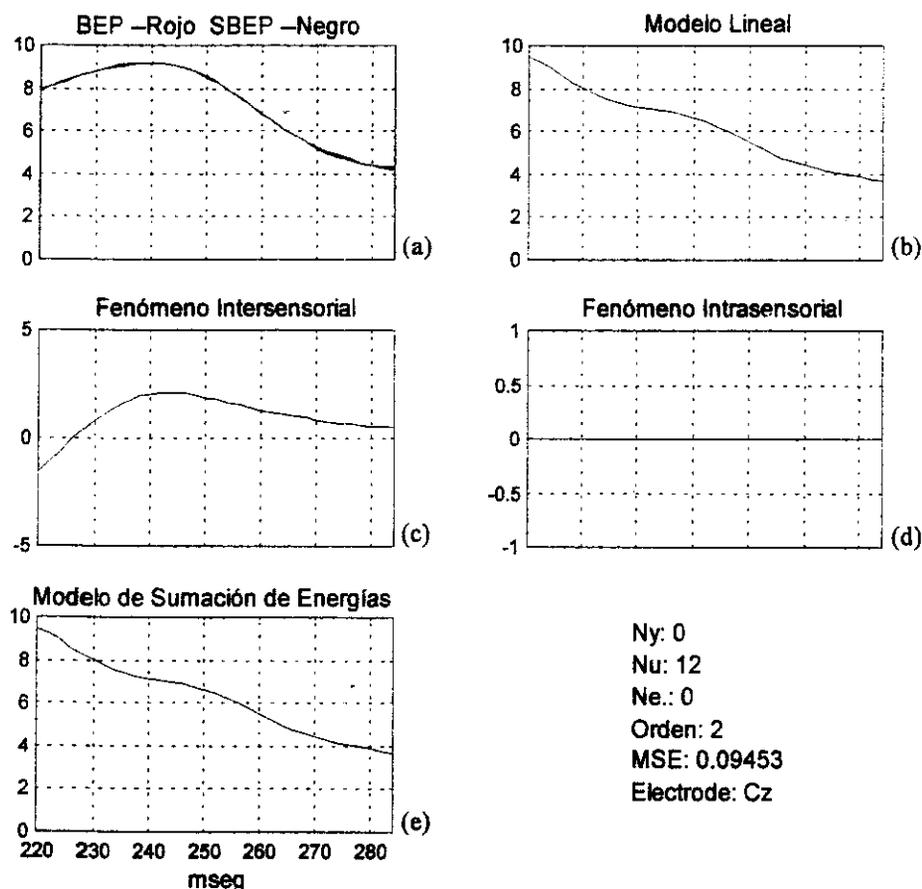


Figura VIII.5.5. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

origenen en forma tardía en comparación con los obtenidos en el cuarto experimento.

La segunda ventana de tiempo, iniciando en los 220 milisegundos y terminando en los 284 milisegundos, involucra un pico bimodal alrededor de los 240 milisegundos, el proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, figura VIII.5.3(b). Los resultados del modelo no-lineal, figura VIII.5.5(a)-(e), indican la presencia de contribuciones del tipo lineal y no-lineal, con una morfología "parecida" a las obtenidas en el tercer

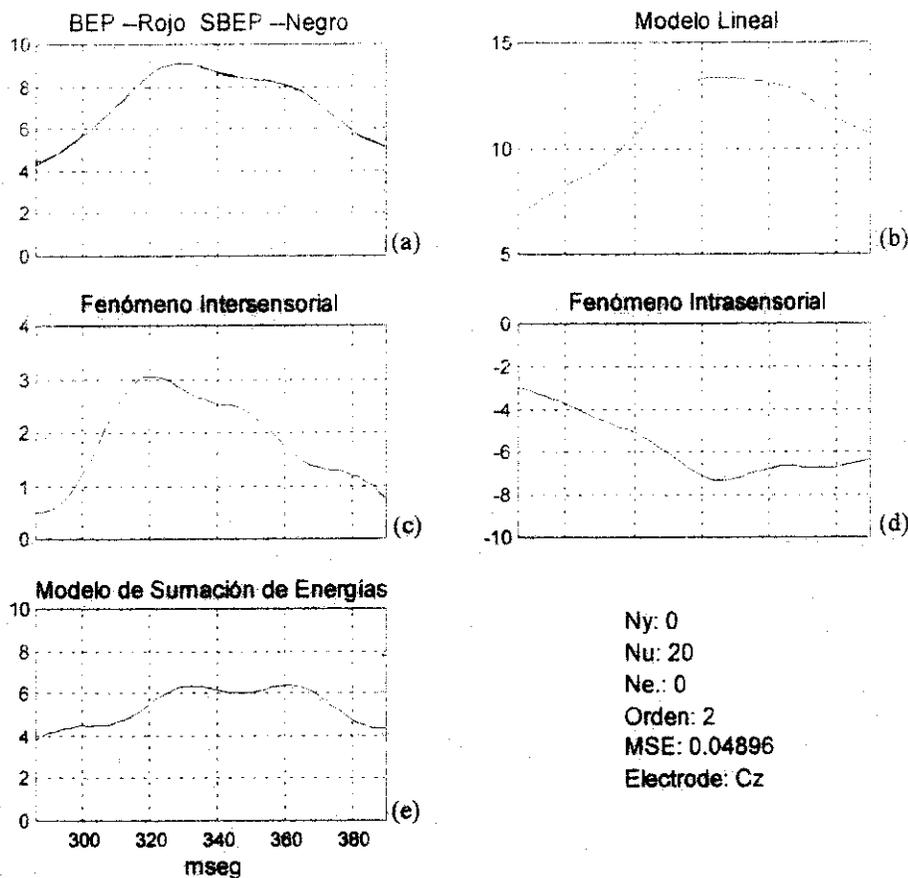


Figura VIII.5.6. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

experimento. El fenómeno intersensorial tiene una pendiente de subida hasta los 240 milisegundos y posteriormente se decrementa. Parece ser que un proceso de análisis similar se genera en esta ventana, sin embargo, el grado y latencias de la actividad eléctrica generada dependen de la dificultad de la tarea asignada al sujeto. En el cuarto experimento la curva del fenómeno intersensorial decae después de los 250 milisegundos mientras que para el tercer experimento permanece constante.

La tercera ventana de análisis mostrada en la figura VIII.5.3.(c), iniciando en los 286 milisegundos y finalizando en los 390 milisegundos, contiene actividad relacionada con procesos visuales cognoscitivos indexados por las ondas P300a y P300b, la onda cognoscitiva auditiva P300a y las ondas bimodales P300a y P300b. Los resultados del modelo indican una contribución del fenómeno intersensorial importante en comparación con la contribución del modelo de sumación de energías. El fenómeno intersensorial tiene una morfología similar a la morfología del fenómeno intersensorial obtenido en el tercer experimento, pero con una amplitud menor. El pico bimodal, alrededor de los 330 milisegundos, podría pensarse como el resultado de una interacción no-lineal entre las trayectorias sensoriales auditiva y visual debido a que en esa latencia el fenómeno intersensorial alcanza su máximo valor, figura VIII.5.6(c). En el tercer experimento, la actividad bimodal parece estar más relacionada con la actividad visual que con la información auditiva cognoscitiva acelerando los procesos cognoscitivos visuales para decidir si la combinación de estímulos es la correcta. En el cuarto experimento, experimento en donde el sujeto tiene una menor discriminabilidad de estímulos, la actividad bimodal, auditiva y visual se comportan un poco diferente en comparación con el tercer experimento, situación que posiblemente se refleja en un decremento en el comportamiento no-lineal. El potencial evocado bimodal después de los 392 milisegundos,

figura VIII.5.1(a), muestra un decremento en su actividad mientras que existe o persiste información cognoscitiva visual y auditiva.

TABLA VIII.5.1
Coefficientes del Modelo No-Lineal.

Ventana # 1		Ventana # 2		Ventana # 3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.959	$u_A(n-1)$	+0.298	$u_A(n-8)$	+0.177	$u_V(n-2)$
+0.373	$u_A(n-9)$	+0.050	$u_A(n-1)*u_V(n-1)$	-0.148	$u_A(n-1)*u_A(n-2)$
-0.650	$u_A(n-13)$	+0.045	$u_A(n-3)*u_A(n-4)$	+0.054	$u_A(n-1)*u_A(n-12)$
+1.00	$u_V(n-1)$			+0.007	$u_A(n-1)*u_V(n-3)$
+0.816	$u_V(n-13)$			-0.099	$u_A(n-3)*u_V(n-1)$
+0.013	$u_A(n-1)*u_A(n-2)$			+0.022	$u_A(n-12)*u_V(n-1)$
-0.053	$u_A(n-1)*u_V(n-3)$				
-0.044	$u_A(n-1)*u_V(n-11)$				

Los resultados del cuarto experimento pueden resumirse como sigue: la información cognoscitiva auditiva para la segunda y para la tercera ventana presentan una amplitud mayor en comparación con la actividad del tercer experimento. Parece ser que identificar el tono de 1100 Hz del tono de 1060 Hz requiere de la utilización de más recursos neuronales que para identificar el tono de 1100 Hz del tono de 1000 Hz. Por otra parte, la información visual de la tercera ventana es mayor en el tercer experimento en comparación con el cuarto experimento, sugiriendo que la confianza del sujeto es mayor en el tercer experimento. El proceso de cierre para el cuarto experimento tiene una amplitud menor que posiblemente se relacione con la mayor dificultad de la tarea asignada al sujeto. Finalmente, el modelo no-lineal indica que diferencias entre los potenciales unimodales y bimodal del tercer y cuarto experimentos conducen a diferentes comportamientos no-lineales.

VIII.5.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

A pesar de observar algunos cambios del fenómeno intersensorial entre el tercer y cuarto experimento en el electrodo Cz, es conveniente realizar el análisis espacial del fenómeno intersensorial. Para obtener una visión global de las actividades adquiridas, los potenciales unimodales y bimodal se muestran en las figuras VIII.5.7-8. En la representación horizontal, figura VIII.5.7, se pueden observar una fuerte actividad exógena auditiva fronto-central, un proceso de categorización

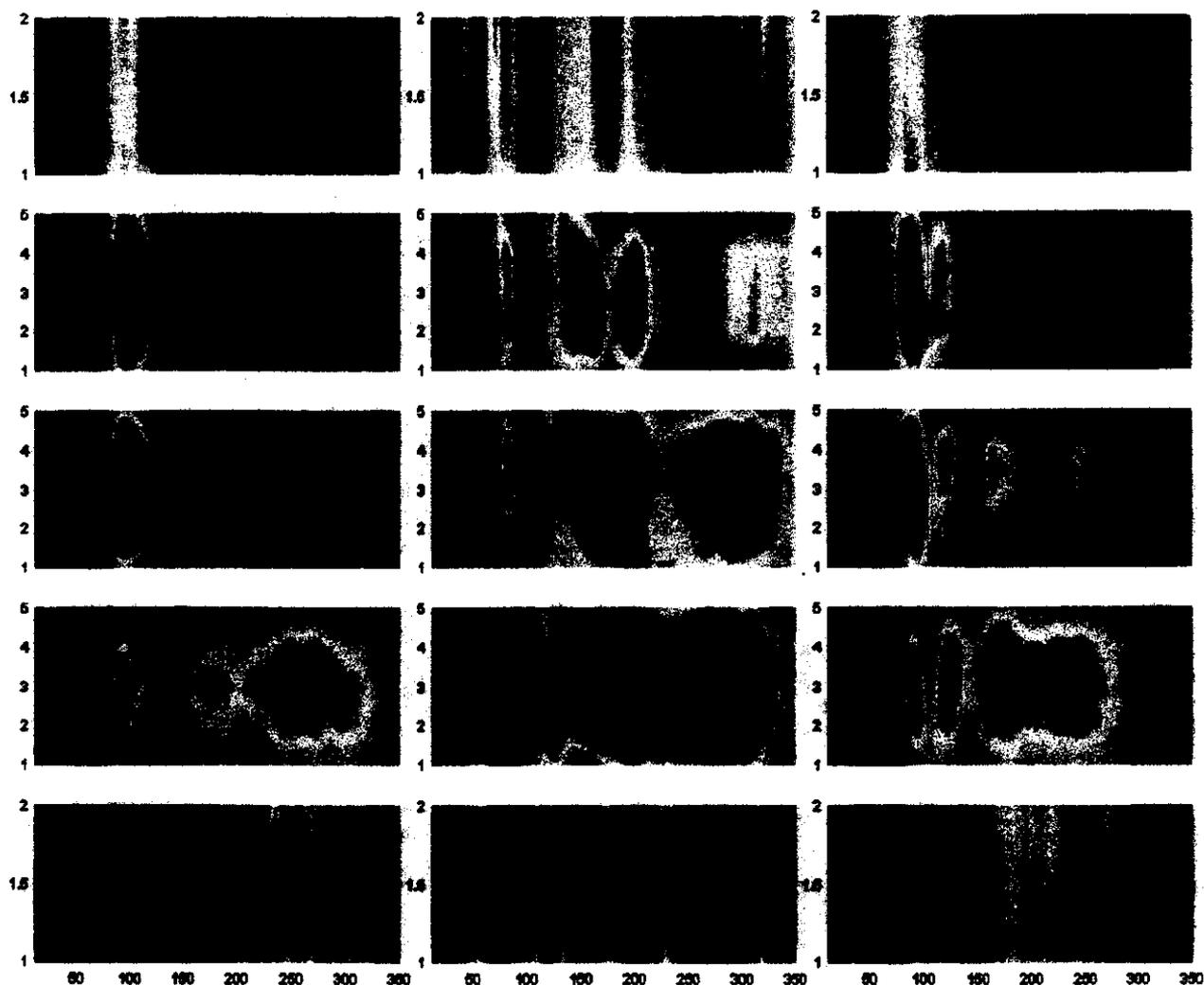


Figura VIII.5.7. Representación horizontal de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos occipitales del sistema 10-20.

del estímulo y el proceso de decisión localizado en la región parietal. Los procesos de detección y categorización del estímulo son de menor duración y con una amplitud menor que aquellos obtenidos en el tercer experimento, mientras que la distribución espacial de los procesos de cierre parece similar para ambos experimentos. Para el tercer y cuarto experimento los componentes visuales N100 y P200 presentan una distribución espacial similar, sin embargo, para el cuarto experimento la amplitud del componente N100 se decrementa mientras que la amplitud del componente P200 se incrementa. La

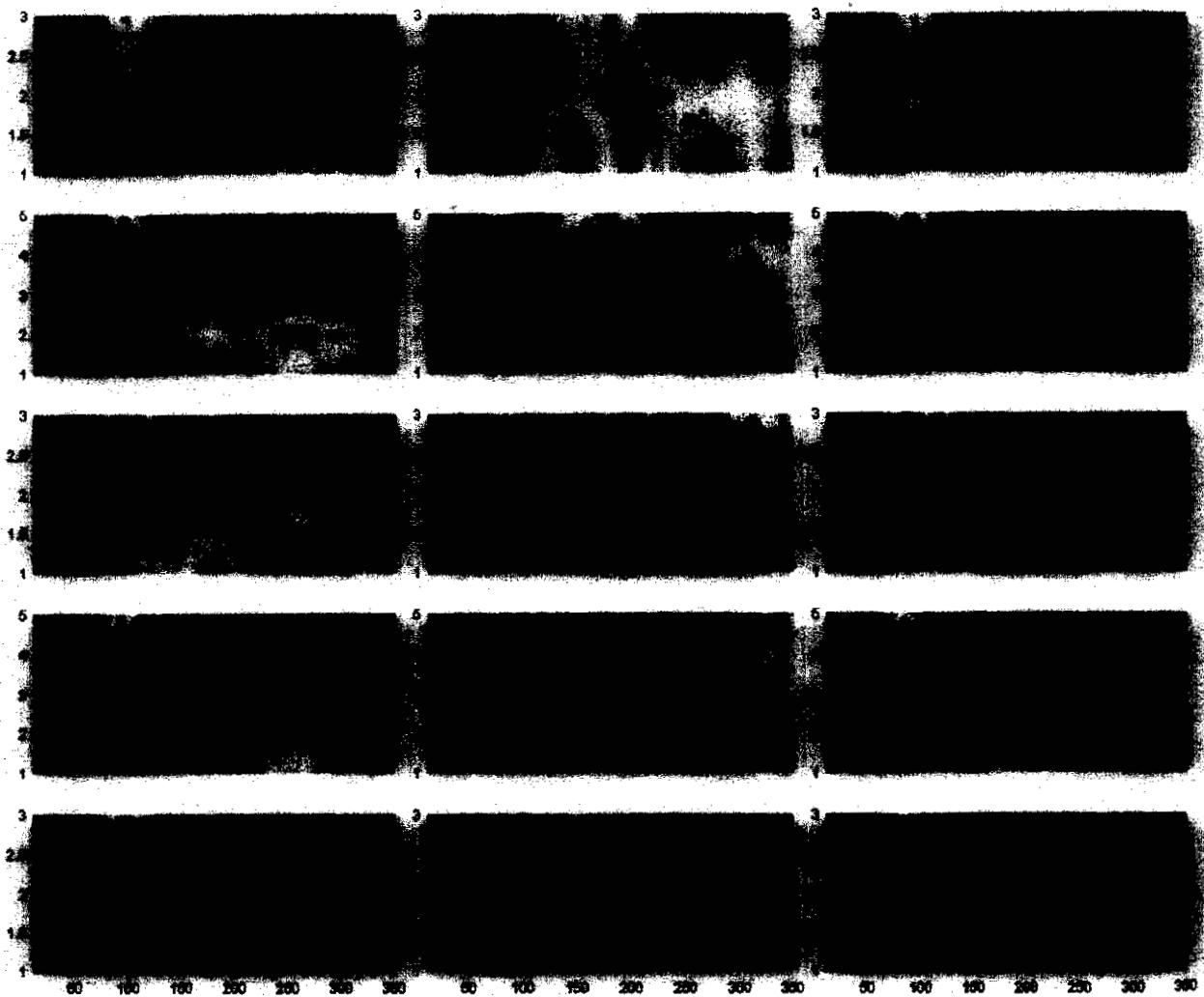


Figura VIII.5.8. Representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos F8, T4 y T6 del sistema 10-20.

mayor amplitud del componente P200 posiblemente se origine por el traslape de actividad exógena y un proceso de categorización más difícil. El componente N200 también incrementa su amplitud. El componente P300 muestra una mayor amplitud en las regiones central y parietal, generándose antes que la componente P300 del tercer experimento. La distribución espacial de los componentes bimodales exógenos y endógenos parece similar en ambos experimentos, sin embargo, la amplitud de la actividad incluida en la segunda ventana de análisis para el electrodo Cz, presenta una menor amplitud.

En la representación vertical, figura VIII.5.8, los componentes N100 y P200 auditivos parecen presentar un comportamiento simétrico y una actividad cognoscitiva importante para el electrodo Pz.

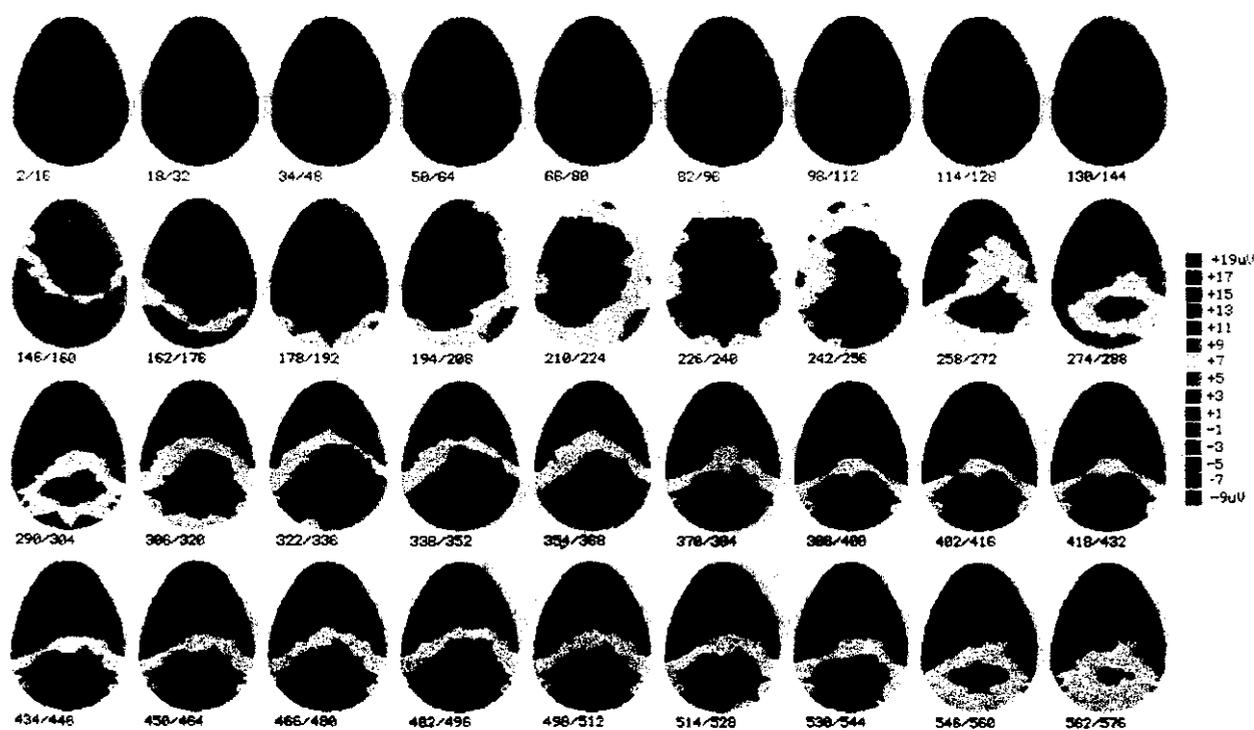


Figura VIII.5.9. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

La representación visual indica una simetría de los componentes exógenos y de la actividad indexada por N200 en el área del vertex mientras que se presenta una actividad intensa en la región vertex-parietal con una pequeña lateralización hacia la izquierda para el proceso de cierre indexado por las ondas P300a y P300b.

Los componentes bimodales exógenos y endógenos presentan distribuciones espaciales similares para el tercer y cuarto experimento, es decir, una distribución simétrica para los componentes exógenos mientras que el proceso de categorización del estímulo bimodal se encuentra lateralizado hacia la izquierda. Sin embargo, para el presente experimento se aprecia una reducción en amplitud del proceso de categorización de los estímulos. El componente bimodal P300 presenta una actividad intensa en la región parietal con una ligera lateralización hacia la izquierda. Con el propósito de apoyar la interpretación de la distribución espacial bimodal se presentan en la figura VIII.5.9 mapas topográficos con una resolución de 15 milisegundos. En la latencia de 90

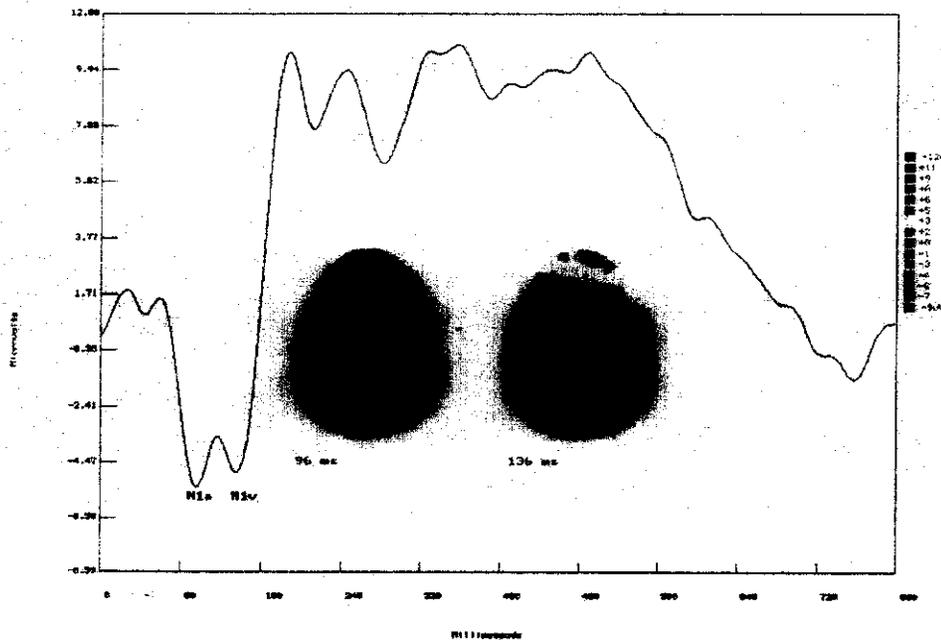


Figura VIII.5.10. Distribución espacial del componente bimodal N100.

milisegundos se presenta una fuerte actividad negativa central similar a la desarrollada por el componente auditivo N100. La negatividad se dispersa hacia la región parietal-occipital acompañada

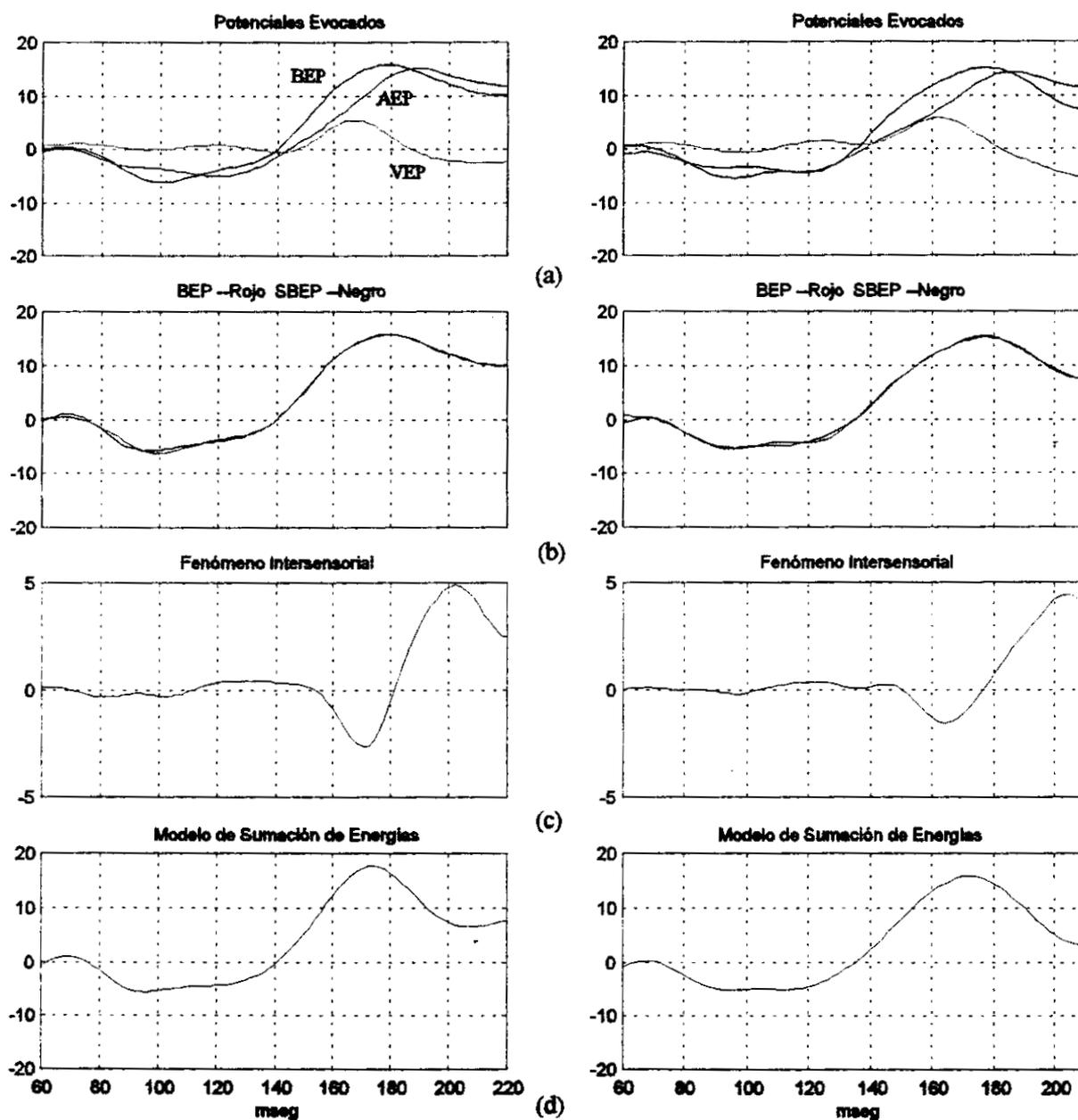


Figura VIII.5.11. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos F3 y F4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

por una positividad frontal generando una distribución similar a la del componente N100 visual. El componente N100 bimodal se dispersa en mayor medida y presenta mayor intensidad en el presente experimento. El fenómeno de "switch", explicado en el primer experimento, se muestra en la figura

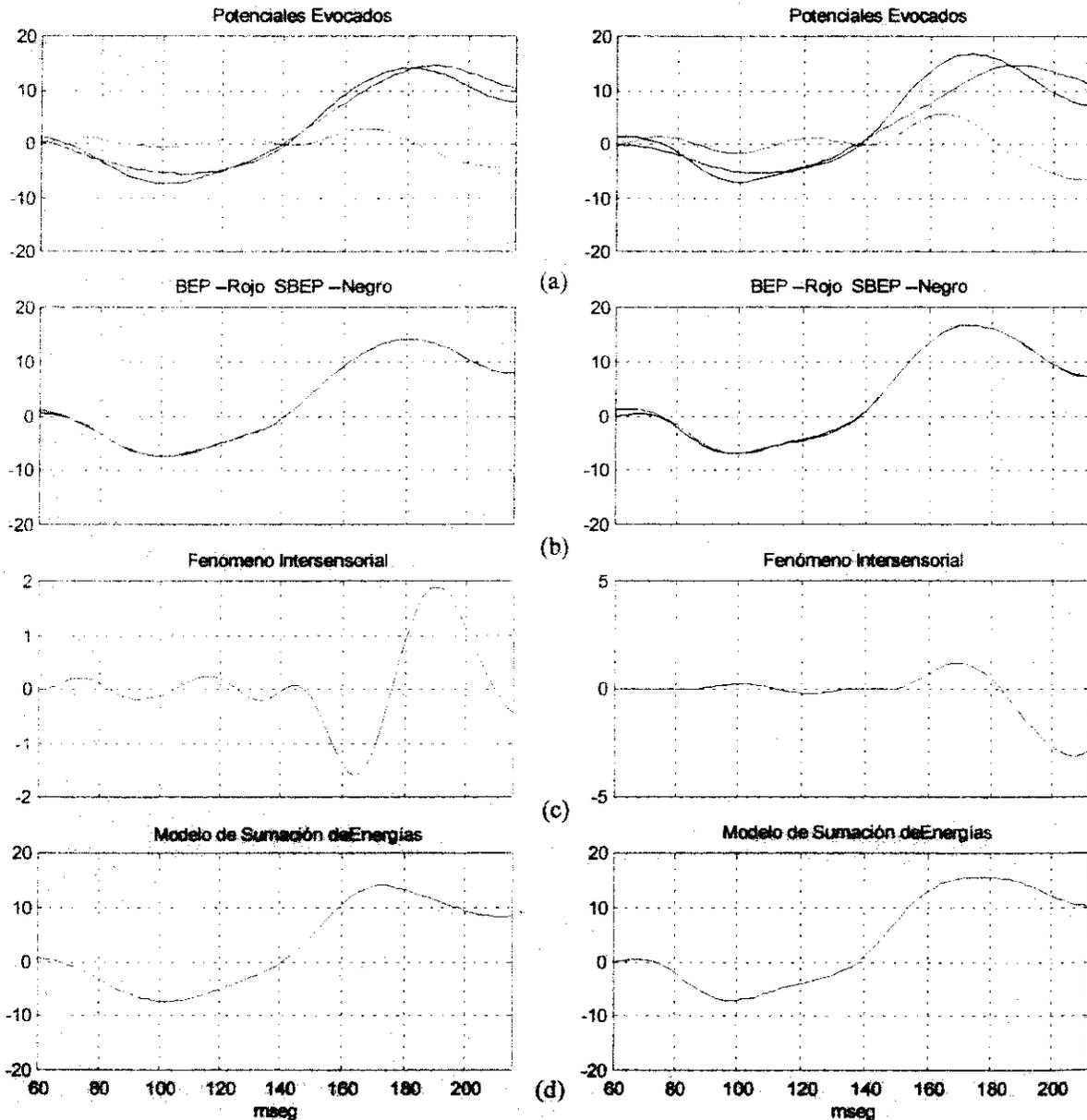


Figura VIII.5.12. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos C3 y C4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

VIII.5.10 para el electrodo P3. De los 162 milisegundos y hasta los 192 milisegundos se presenta una positividad fronto-central que corresponde al componente bimodal P200. Esta actividad eléctrica se presenta en forma temprana para el presente experimento en comparación con el tercer experimento.

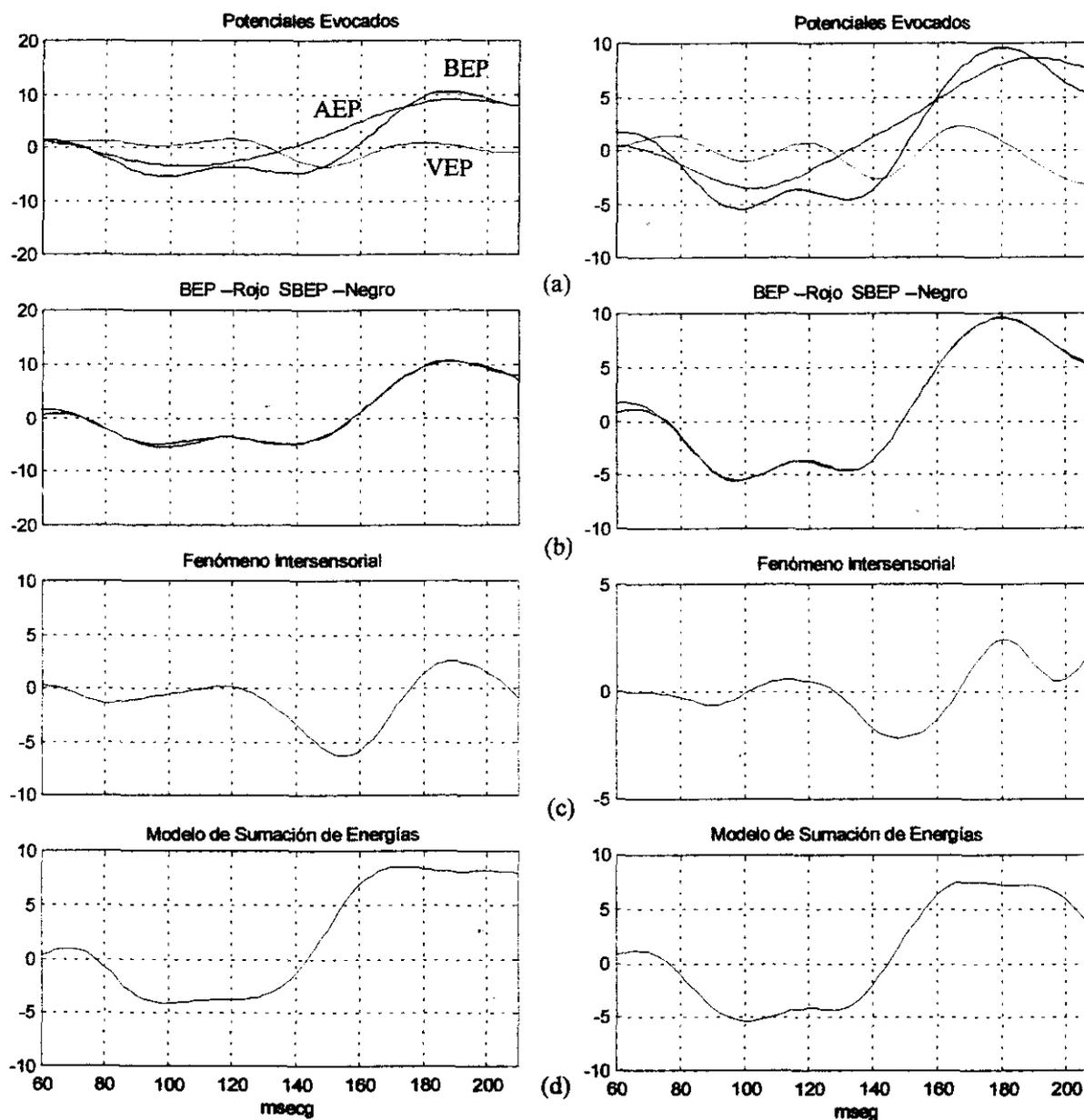


Figura VIII.5.13. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos P3 y P4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

La actividad correspondiente a la segunda ventana de análisis, incluyendo la categorización del estímulo auditivo y la post-categorización del estímulo visual, se dispersa desde la región frontal hacia la región parietal generandose también en forma más temprana. El componente P300 se presenta

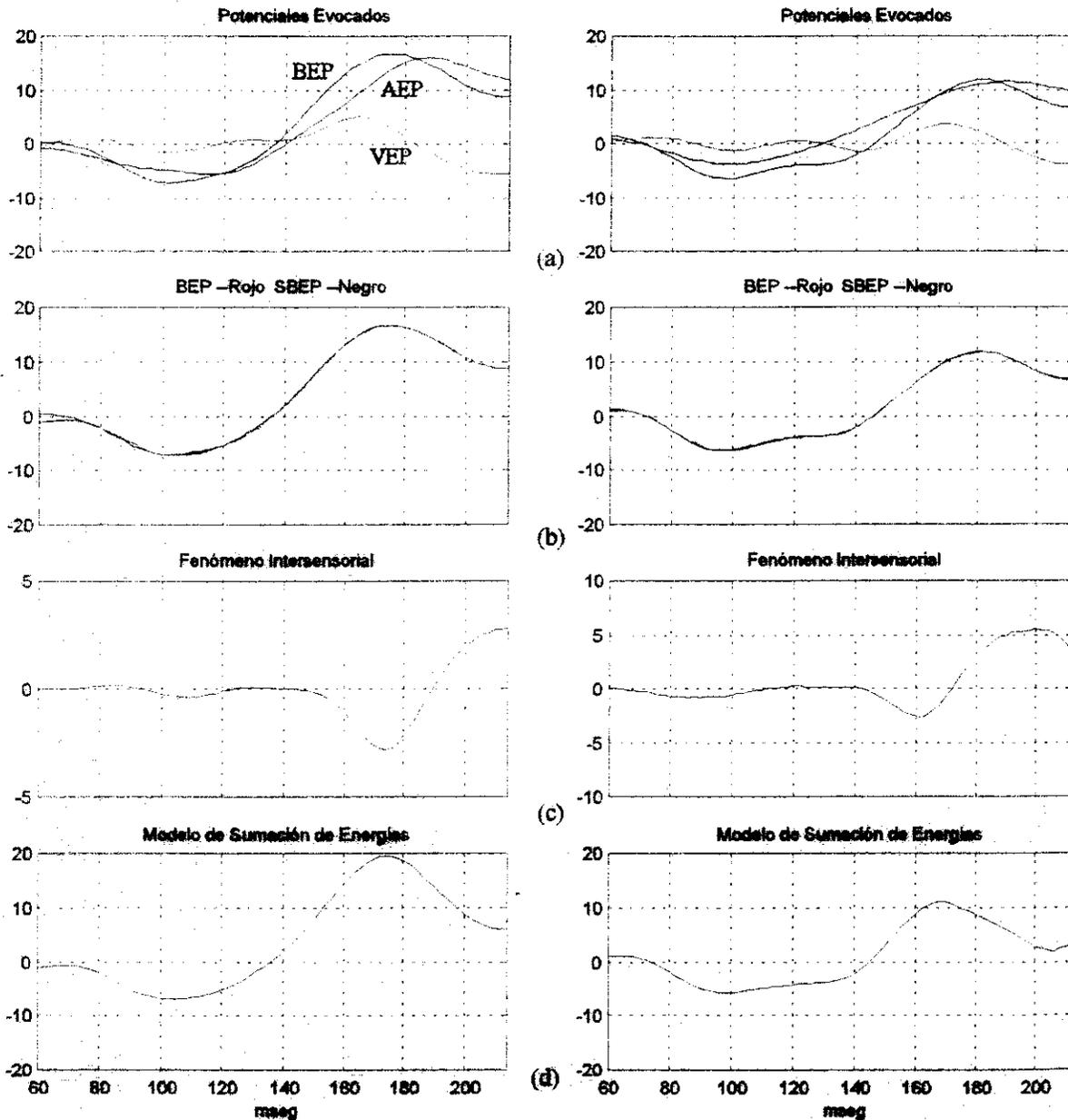


Figura VIII.5.14. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos Fz y Pz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

posteriormente con una clara distribución parietal-occipital.

VIII.5.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal

La primera ventana de análisis en varios electrodos se muestra en las figuras VIII.5.11-14. Los resultados del modelo no-lineal revelan que el componente N100 bimodal, en la región frontal y de vertex, puede explicarse mediante el modelo de sumación de energías. El fenómeno intersensorial es significativo a partir de los 140 milisegundos, figuras VIII.5.11(c)-14(c). En la región parietal, el proceso de detección de los estímulos posiblemente se afecta por la interacción de los procesos de categorización visual y auditivo, que podría estar relacionado con el incremento del fenómeno intersensorial, figura VIII.5.13(c). El fenómeno intersensorial parece ser más intenso en la región frontal y en la parietal sugiriendo que el fenómeno de interacción sensorial depende de la relevancia del estímulo y en consecuencia, de su predominancia espacial. Los coeficientes del modelo se presentan en la Tabla VIII.5.2.

TABLA VIII.5.2
Coeficientes del Modelo No-Lineal para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+1.325	$u_A(n-1)$	+1.160	$u_A(n-1)$	+1.289	$u_A(n-1)$	+1.170	$u_A(n-1)$
-0.498	$u_A(n-14)$	-0.178	$u_A(n-12)$	-0.096	$u_A(n-10)$	+0.711	$u_V(n-1)$
+0.721	$u_V(n-1)$	+1.115	$u_V(n-1)$	+0.910	$u_V(n-1)$	-0.475	$u_V(n-10)$
-0.800	$u_V(n-14)$	+0.083	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.006	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.018	$u_A(n-1)u_V(n-10)$
+0.382	$u_A(n-1)u_V(n-11)$	-0.123	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	-0.038	$u_A(n-1)u_A(n-9)$	-0.126	$u_A(n-1)u_V(n-1)$
-0.383	$u_A(n-4)u_V(n-10)$	+0.119	$u_V(n-6)u_V(n-10)$	-0.116	$u_A(n-8)u_V(n-1)$	+0.101	$u_A(n-4)u_V(n-3)$
-0.051	$u_A(n-6)u_V(n-2)$	-0.082	$u_V(n-7)u_V(n-11)$	+0.065	$u_A(n-10)u_V(n-4)$	+0.012	$u_A(n-10)u_V(n-1)$
-0.018	$u_V(n-11)u_V(n-12)$			-0.007	$u_V(n-1)u_V(n-3)$		

TABLA VIII.5.2 (Cont.)

C4		P3		P7		P4	
1.181	$u_A(n-1)$	1.377	$u_A(n-6)$	1.072	$u_A(n-4)$	1.436	$u_A(n-4)$
1.151	$u_V(n-1)$	-0.51	$u_A(n-15)$	0.367	$u_V(n-1)$	0.304	$u_V(n-1)$
-0.66	$u_V(n-4)$	0.406	$u_V(n-1)$	-1.08	$u_V(n-10)$	-0.75	$u_V(n-8)$
0.034	$u_A(n-7)u_V(n-1)$	-1.05	$u_V(n-6)$	0.482	$u_A(n-1)u_V(n-7)$	0.151	$u_A(n-1)u_V(n-7)$
		0.621	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	1.141	$u_A(n-3)u_V(n-10)$	-0.1	$u_A(n-14)u_V(n-17)$
		0.368	$u_A(n-6)u_V(n-5)$	-0.88	$u_A(n-5)u_A(n-8)$	-0.13	$u_A(n-16)u_A(n-17)$
		-0.77	$u_A(n-7)u_V(n-1)$	-0.6	$u_A(n-6)u_V(n-6)$	-0.22	$u_A(n-17)u_V(n-3)$
				-0.28	$u_A(n-9)u_A(n-10)$	0	$u_A(n-17)u_V(n-8)$
				-0.15	$u_A(n-10)u_V(n-1)$	-0.15	$u_V(n-6)u_V(n-7)$
				0.255	$u_A(n-10)u_V(n-5)$	-0.1	$u_V(n-12)u_V(n-13)$

En la figura VIII.5.15 se presentan las actividades unimodales y bimodales adquiridas para la segunda ventana de análisis. Parece ser que la actividad bimodal en la región frontal se afecta en forma predominante por la actividad auditiva mientras que en la región parietal la actividad bimodal esta más relacionada con la actividad visual. Los resultados del modelo no-lineal, reportados en las figuras VIII.5.16-18, indican que el modelo de suma de energías no es suficiente para explicar la actividad bimodal adquirida y en consecuencia, se presenta en todos los electrodos un fenómeno intersensorial significativo. Los resultados del modelo no-lineal muestran que el fenómeno intersensorial es más intenso en las regiones frontales y parietales, además concordando con la información proporcionada por los mapas topográficos en el sentido de que existe una lateralización derecha. En comparación con los resultados del tercer experimento, el fenómeno intersensorial refleja un proceso de categorización del estímulo más complejo. Los coeficientes del modelo no-lineal se

reportan en la Tabla VIII.5.3.

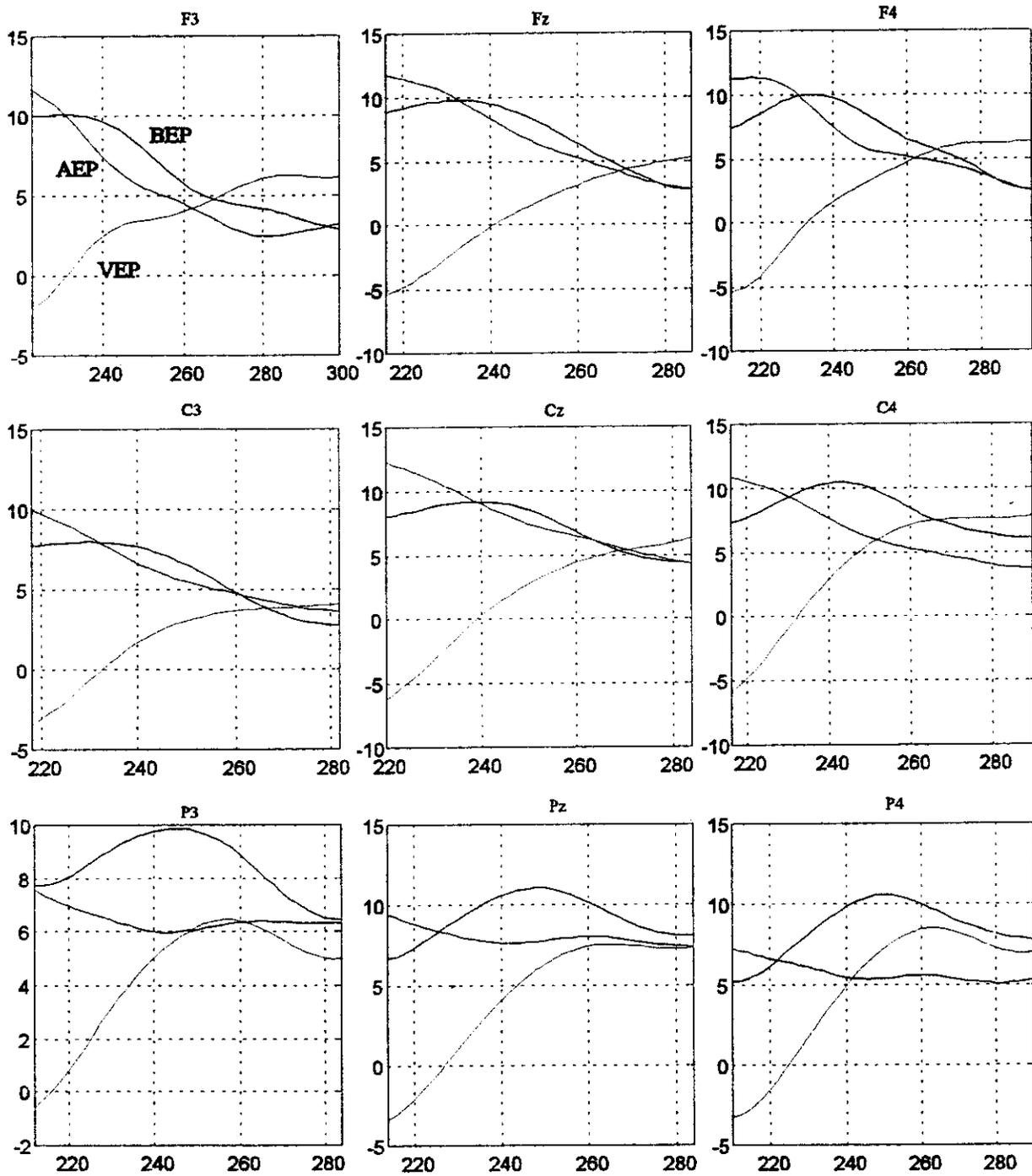


Figura VIII.5.15. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

TABLA VIII.5.3 Coeficientes del Modelo No-Lineal para la Segunda Ventana de Análisis.							
F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.266	$u_A(n-1)$	+0.708	$u_A(n-8)$	+0.601	$u_A(n-10)$	+0.766	$u_A(n-1)$
+1.062	$u_A(n-10)$	+0.842	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-1)$	+0.010	$u_A(n-1)u_A(n-3)$	-0.255	$u_A(n-4)$
-0.058	$u_A(n-4)u_A(n-10)$	-0.836	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-2)$	+0.120	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-1)$	+0.534	$u_A(n-8)$
-0.073	$u_A(n-4)u_{\sqrt{}}(n-10)$	+0.274	$u_{\sqrt{}}(n-1)u_{\sqrt{}}(n-6)$	+0.038	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-2)$	+0.278	$u_{\sqrt{}}(n-1)$
+0.036	$u_{\sqrt{}}(n-9)u_{\sqrt{}}(n-10)$	+0.190	$u_{\sqrt{}}(n-2)u_{\sqrt{}}(n-6)$	-0.064	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-9)$	+0.064	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
		-0.505	$u_{\sqrt{}}(n-4)u_{\sqrt{}}(n-5)$	-0.100	$u_A(n-2)u_{\sqrt{}}(n-3)$	+0.072	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-1)$
				+0.025	$u_A(n-5)u_{\sqrt{}}(n-2)$	-0.094	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-5)$
				+0.051	$u_{\sqrt{}}(n-2)u_{\sqrt{}}(n-3)$	-0.058	$u_A(n-6)u_A(n-8)$
				-0.066	$u_{\sqrt{}}(n-9)u_{\sqrt{}}(n-10)$	-0.139	$u_{\sqrt{}}(n-7)u_{\sqrt{}}(n-8)$

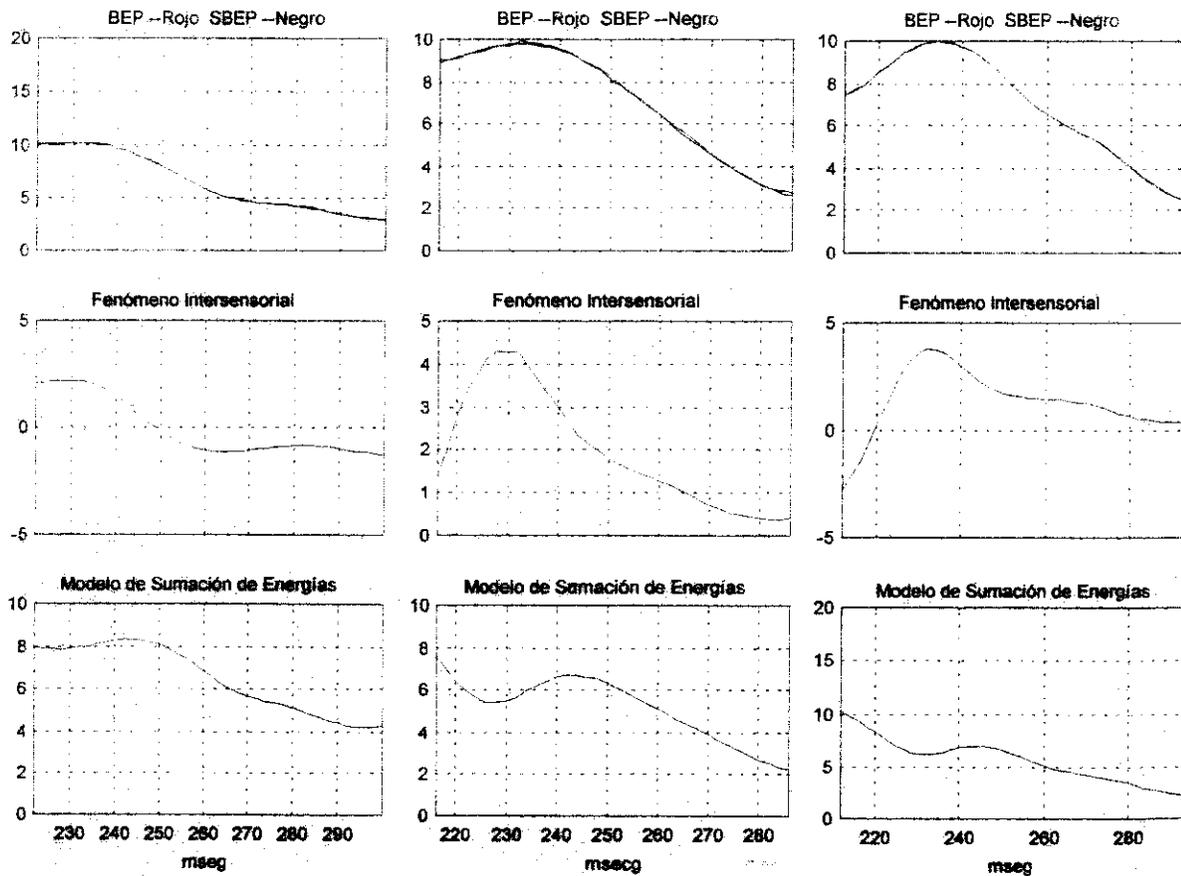


Figura VIII.5.16. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

TABLA VIII.5.3 (Cont.)

C4		P3		Pz		P4	
0.677	$u_A(n-6)$	0.842	$u_A(n-1)$	0.723	$u_A(n-1)$	0.555	$u_A(n-1)$
0.818	$u_A(n-10)$	1.212	$u_A(n-2)$	0.08	$u_A(n-1)u_A(n-5)$	0.525	$u_A(n-12)$
-0.1	$u_A(n-1)u_A(n-3)$	-0.1	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	0.974	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-7)$	0	$u_A(n-2)u_A(n-12)$
0.254	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-1)$	0.228	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-2)$	-1.08	$u_A(n-1)u_{\sqrt{}}(n-8)$	0.1	$u_A(n-12)u_{\sqrt{}}(n-1)$
-0.23	$u_A(n-2)u_{\sqrt{}}(n-2)$	-0.3	$u_A(n-5)u_{\sqrt{}}(n-1)$	-0.1	$u_A(n-3)u_A(n-4)$	0.04	$u_{\sqrt{}}(n-2)u_{\sqrt{}}(n-12)$
		-0.35	$u_A(n-10)u_{\sqrt{}}(n-1)$	0.117	$u_A(n-7)u_{\sqrt{}}(n-1)$	0.02	$u_{\sqrt{}}(n-4)u_{\sqrt{}}(n-6)$
		0.274	$u_{\sqrt{}}(n-4)u_{\sqrt{}}(n-10)$	1.052	$u_A(n-8)u_{\sqrt{}}(n-8)$		
		0.186	$u_{\sqrt{}}(n-5)u_{\sqrt{}}(n-9)$	0	$u_{\sqrt{}}(n-7)u_{\sqrt{}}(n-8)$		
		0.119	$u_{\sqrt{}}(n-7)u_{\sqrt{}}(n-10)$				
		-0.1	$u_{\sqrt{}}(n-8)u_{\sqrt{}}(n-9)$				
		-0.24	$u_{\sqrt{}}(n-9)u_{\sqrt{}}(n-10)$				

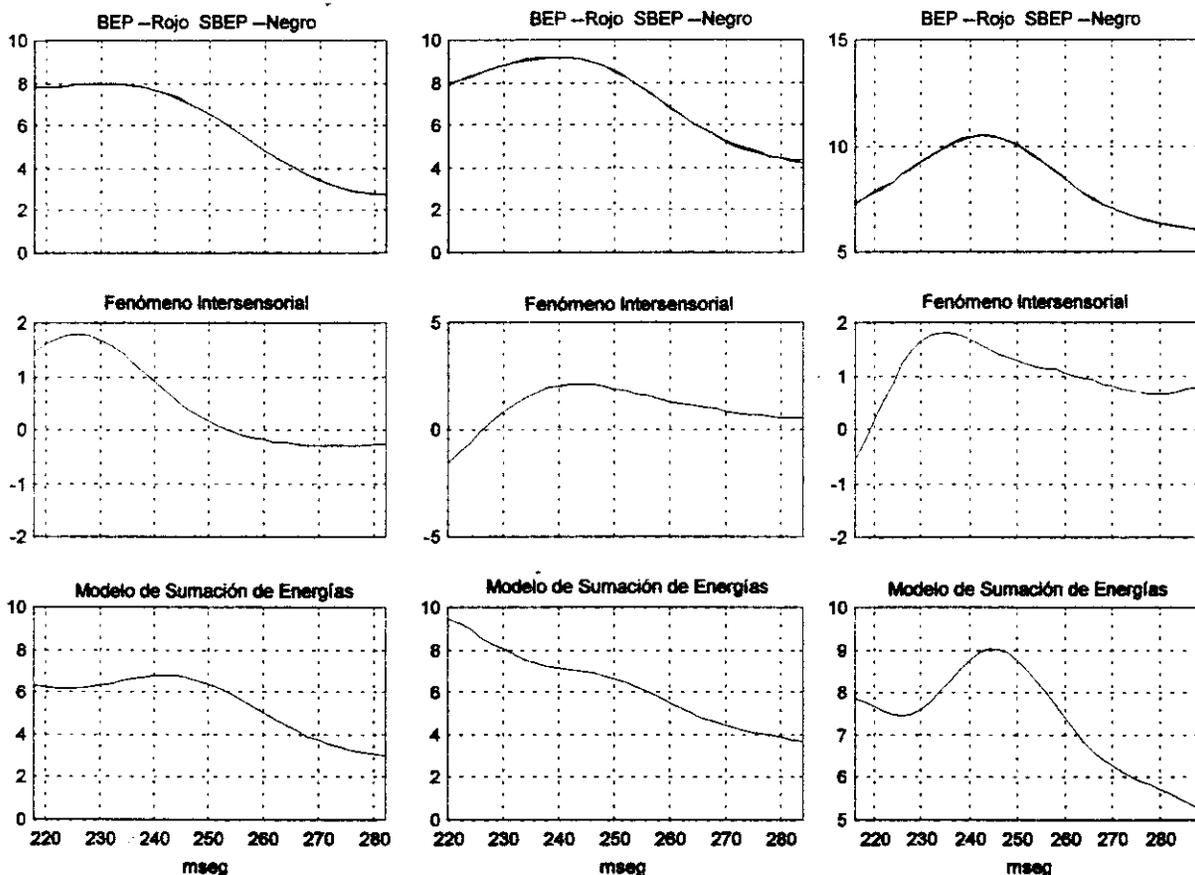


Figura VIII.5.17. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

Las actividades correspondientes a los procesos de cierre unimodales y bimodal para la tercera ventana de análisis se muestran en la figura VIII.5.19. Como puede observarse, la morfología de la actividad eléctrica bimodal se aproxima a la morfología de la actividad eléctrica auditiva en la región frontal y en la central. Los resultados del modelo no-lineal mostrados en las figuras VIII.5.20-22 indican que el fenómeno intersensorial presenta una distribución amplia con un comportamiento simétrico en la región frontal y una lateralización derecha en la región del vertex y parietal.

En comparación con los resultados del modelo no-lineal para el tercer experimento, existe un decremento generalizado del fenómeno intersensorial, situación que sugiere que el comportamiento

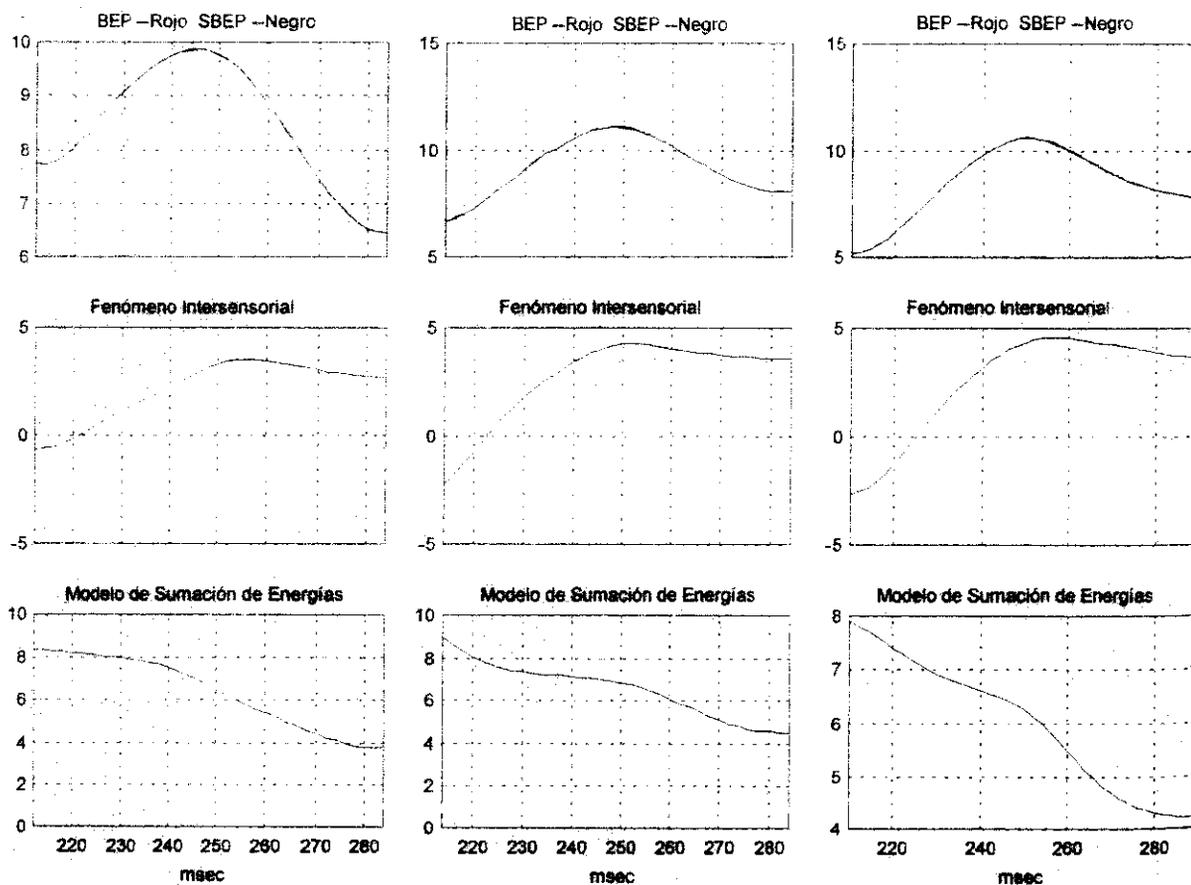


Figura VIII.5.18. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

no-lineal podría relacionarse con la dificultad del experimento y con la confianza del sujeto al realizar la tarea asignada. Los coeficientes del modelo se reportan en la Tabla VIII.5.4.

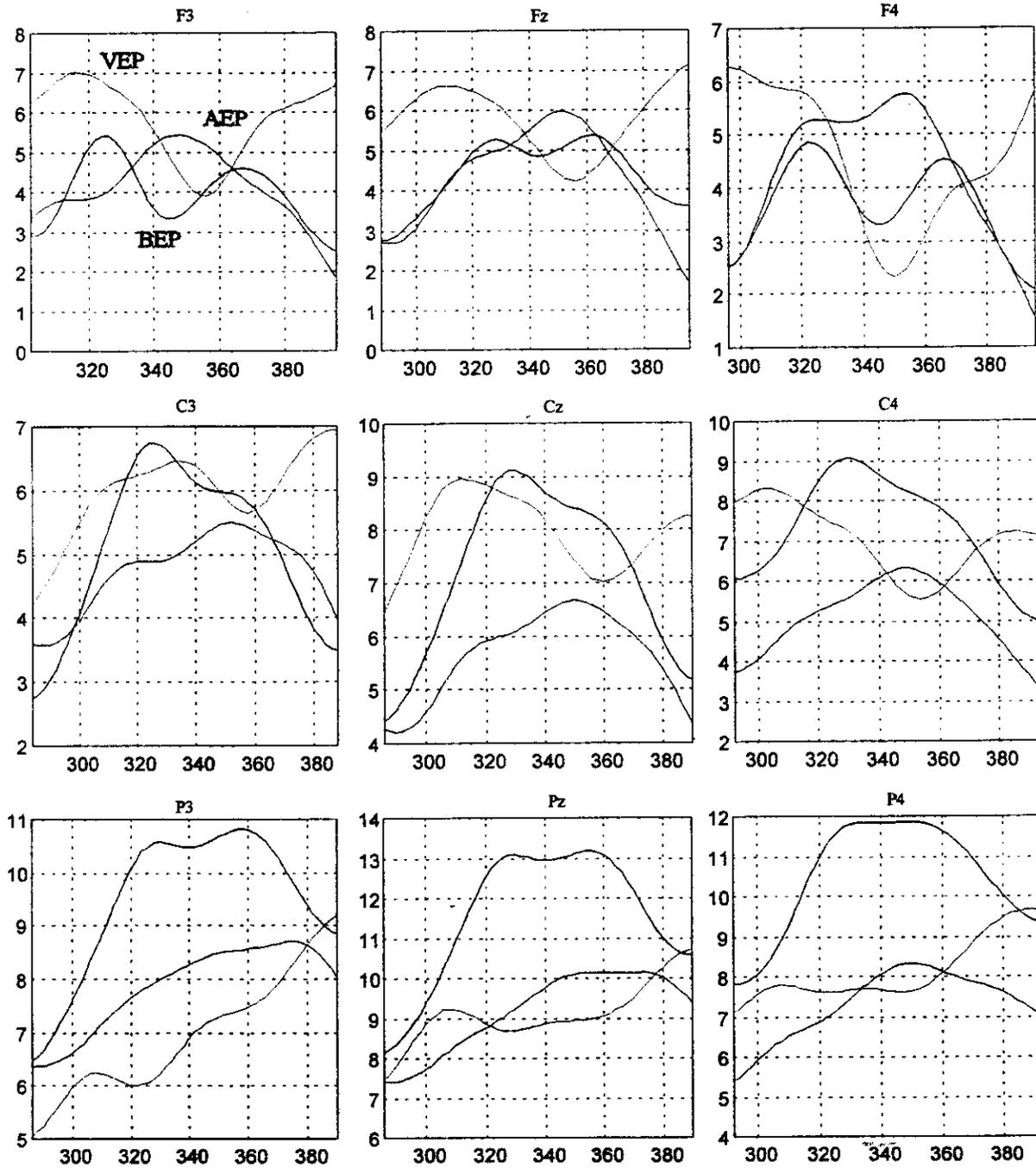


Figura VIII.5.19. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

TABLA VIII.5.4							
Coeficientes del Modelo No-Linear para la Tercera Ventana de Análisis.							
F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.644	$u_A(n-1)u_A(n-7)$	+0.361	$u_A(n-3)$	+0.550	$u_A(n-11)$	+0.208	$u_A(n-1)u_V(n-5)$
-0.567	$u_A(n-3)u_A(n-4)$	+0.041	$u_A(n-4)u_V(n-1)$	+0.140	$u_A(n-1)u_A(n-15)$	-0.200	$u_A(n-12)u_V(n-4)$
-0.098	$u_A(n-3)u_V(n-14)$	+0.226	$u_V(n-1)u_V(n-15)$	+0.070	$u_A(n-1)u_V(n-3)$	-0.166	$u_A(n-16)u_V(n-5)$
+0.140	$u_A(n-5)u_V(n-1)$	-0.047	$u_V(n-1)u_V(n-14)$	+0.037	$u_A(n-1)u_V(n-14)$	+0.180	$u_A(n-20)u_V(n-5)$

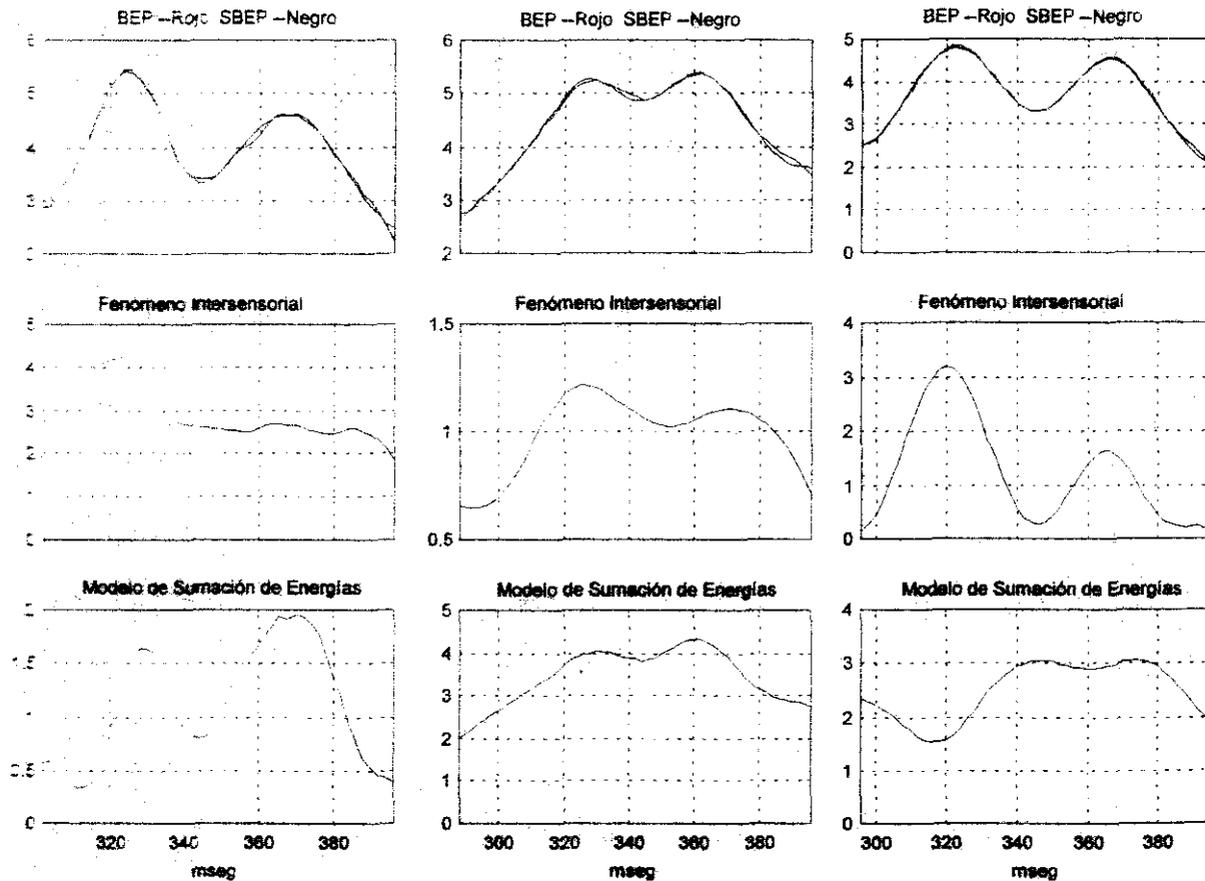


Figura VIII.5.20. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

+0.183	$u_A(n-6)u_V(n-2)$	-0.293	$u_V(n-6)u_V(n-13)$	-0.137	$u_A(n-2)u_A(n-15)$	+0.328	$u_V(n-2)u_V(n-15)$
+0.034	$u_A(n-9)u_V(n-4)$	+0.203	$u_V(n-10)u_V(n-11)$	+0.064	$u_A(n-4)u_V(n-1)$	+0.191	$u_V(n-4)u_V(n-19)$
+0.016	$u_A(n-12)u_V(n-5)$			-0.105	$u_A(n-10)u_V(n-10)$	-0.395	$u_V(n-4)u_V(n-20)$
-0.473	$u_A(n-15)u_V(n-4)$						
+0.318	$u_A(n-15)u_V(n-6)$						

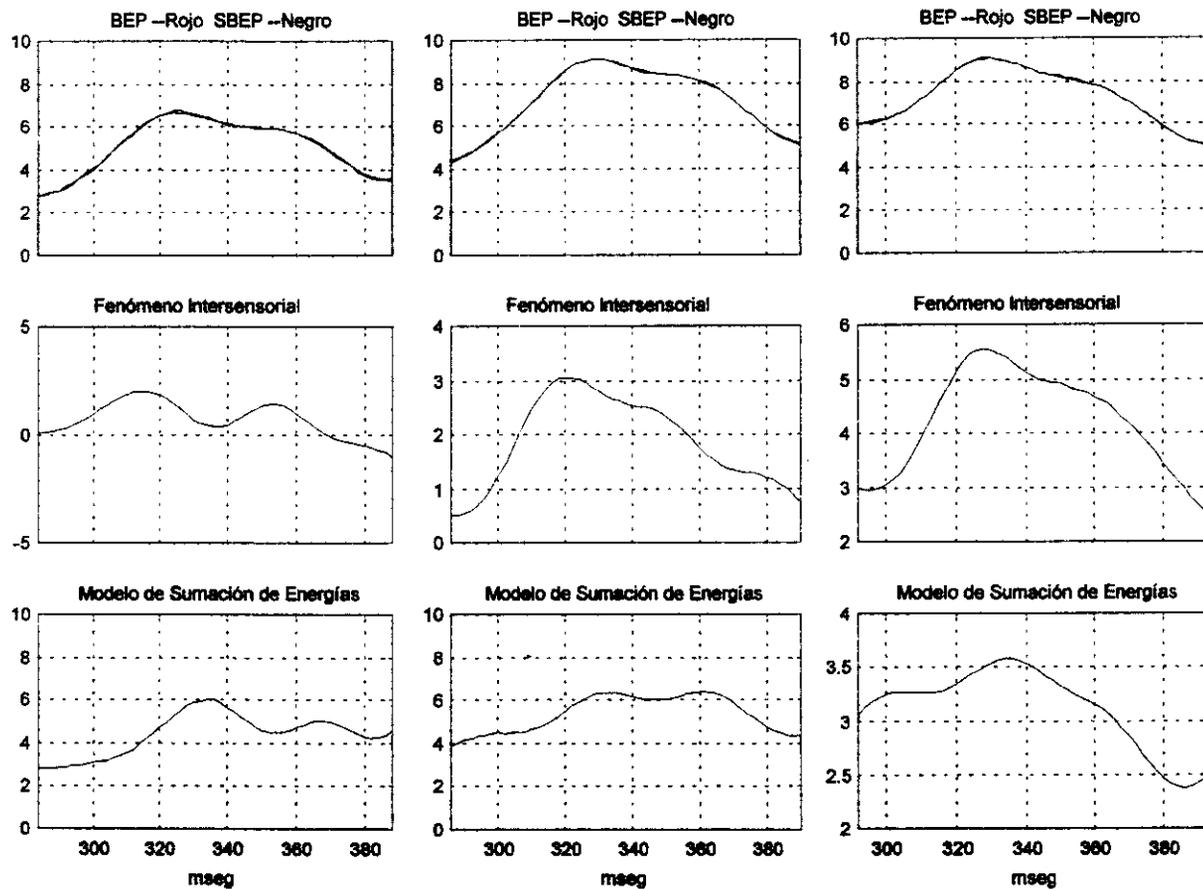


Figura VIII.5.21. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

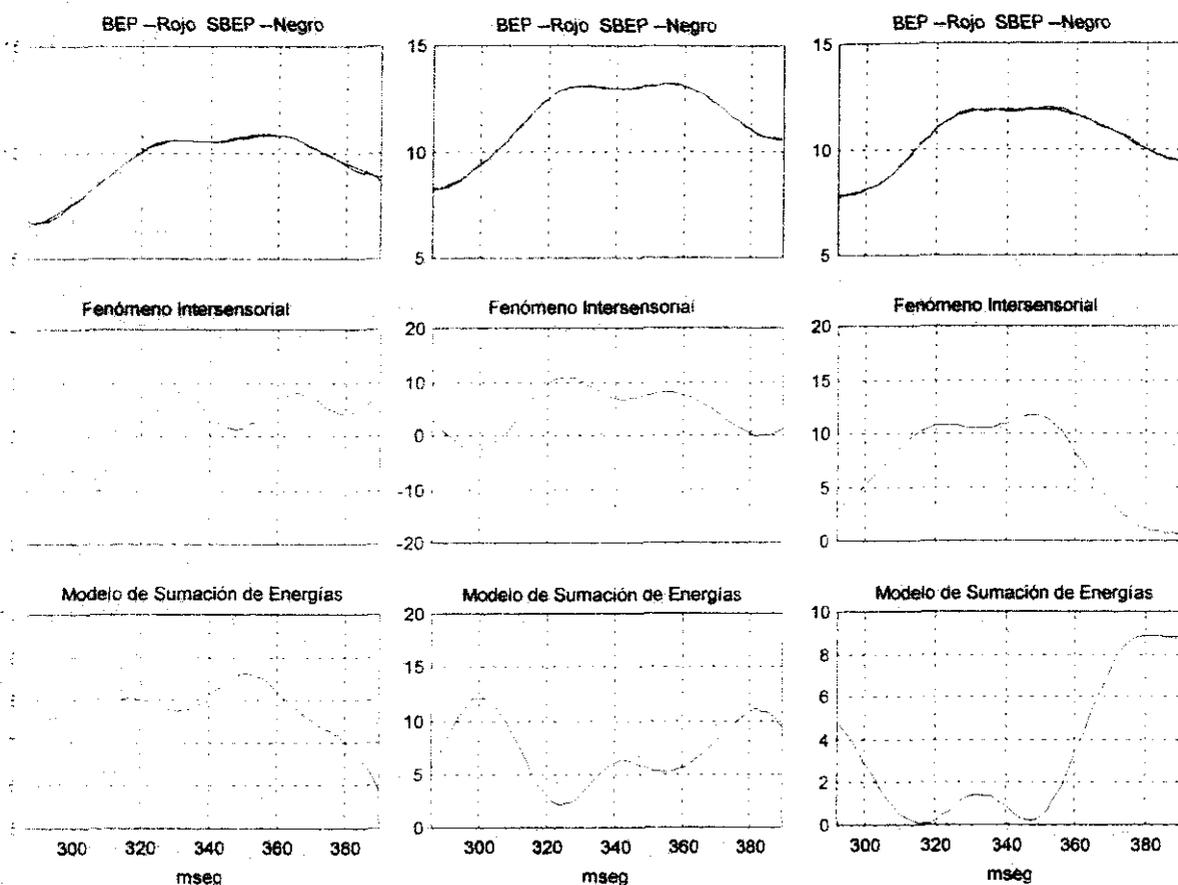


Figura VIII.5.22. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLA VIII.5.4 (Cont.)

C4		P3		Pz		P4	
+0.430	$u_x(n-17)$	+1.437	$u_x(n-1)$	+1.385	$u_x(n-12)$	+0.561	$u_x(n-4)$
+0.085	$u_x(n-1)u_x(n-1)$	-0.046	$u_x(n-1)u_x(n-6)$	+0.249	$u_x(n-1)u_x(n-1)$	+0.674	$u_x(n-1)u_x(n-9)$
+0.012	$u_x(n-2)u_x(n-2)$	+0.021	$u_x(n-1)u_x(n-13)$	-1.202	$u_x(n-5)u_x(n-2)$	-0.396	$u_x(n-2)u_x(n-9)$
+0.176	$u_x(n-4)u_x(n-9)$	+0.309	$u_x(n-9)u_x(n-13)$	+0.852	$u_x(n-5)u_x(n-7)$	-0.264	$u_x(n-3)u_x(n-4)$
-0.232	$u_x(n-4)u_x(n-10)$	-0.247	$u_x(n-15)u_x(n-14)$	+0.107	$u_x(n-7)u_x(n-3)$	+0.436	$u_x(n-3)u_x(n-9)$
+0.129	$u_x(n-8)u_x(n-7)$	-0.100	$u_x(n-14)u_x(n-15)$	+0.413	$u_x(n-8)u_x(n-5)$	-0.248	$u_x(n-10)u_x(n-15)$
+0.092	$u_x(n-9)u_x(n-10)$			-0.297	$u_x(n-15)u_x(n-6)$	+0.253	$u_x(n-13)u_x(n-14)$

-0.059	$u_A(n-10)u_V(n-12)$			-0.056	$u_A(n-17)u_V(n-1)$	+0.287	$u_A(n-14)u_A(n-15)$
+0.091	$u_A(n-18)u_V(n-1)$			+0.975	$u_V(n-2)u_V(n-15)$	-0.025	$u_A(n-15)u_V(n-1)$
-0.258	$u_A(n-18)u_V(n-4)$			-1.104	$u_V(n-7)u_V(n-15)$	-0.605	$u_A(n-15)u_V(n-8)$
+0.083	$u_A(n-18)u_V(n-10)$			+0.034	$u_V(n-9)u_V(n-12)$		

VIII.6. Experimento # 5

En el quinto experimento se estudian las actividades eléctricas generadas en un paradigma de filtrado. En otras palabras, el propósito principal del experimento es comprobar si el sujeto puede ignorar la presencia de un estímulo en una vía sensorial cuando el estímulo relevante se presenta en otra vía sensorial. La tarea del sujeto es oprimir un botón cuando se presenta el tono "infrecuente" de 1100 Hz en forma aislada o en combinación con el flash de color azul o color naranja. El estímulo con baja probabilidad de ocurrencia produce una onda cognoscitiva de mayor amplitud que el estímulo de mayor probabilidad de ocurrencia. La situación anterior puede comprobarse al comparar la actividad cognoscitiva generada por el tono de 1100 Hz con la actividad generada en el tercer experimento, figura VIII.5.1. Una diferencia adicional entre el potencial evocado auditivo del quinto y tercer experimento es la corta duración del proceso de categorización del estímulo y en consecuencia la generación temprana del componente P300. También es de notarse que las ondas P300a y P300b se combinan.

En la figura VIII.6.2(a) se muestra la actividad eléctrica a partir de los 60 y hasta los 640

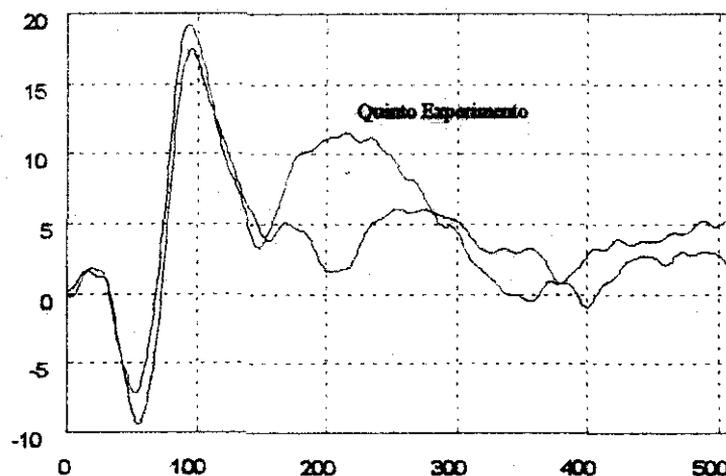


Figura VIII.6.1 Potenciales evocados auditivos obtenidos en el tercer y quinto experimento.

milisegundos para el electrodo Cz. Es importante notar que existen diferencias morfológicas entre los potenciales evocados unimodales y bimodal tanto en sus componentes exógenos como endógenos. El proceso cognoscitivo auditivo inicia en los 300 milisegundos y termina en los 640 milisegundos, figura VIII.6.2(a), mientras que en la información visual es evidente la presencia de un componente negativo, el componente N400. Los resultados del modelo lineal y no-lineal se presentan en la figura VIII.6.2(a)-(b), como puede observarse el ajuste no-lineal es mejor que el proporcionado por un modelo lineal.

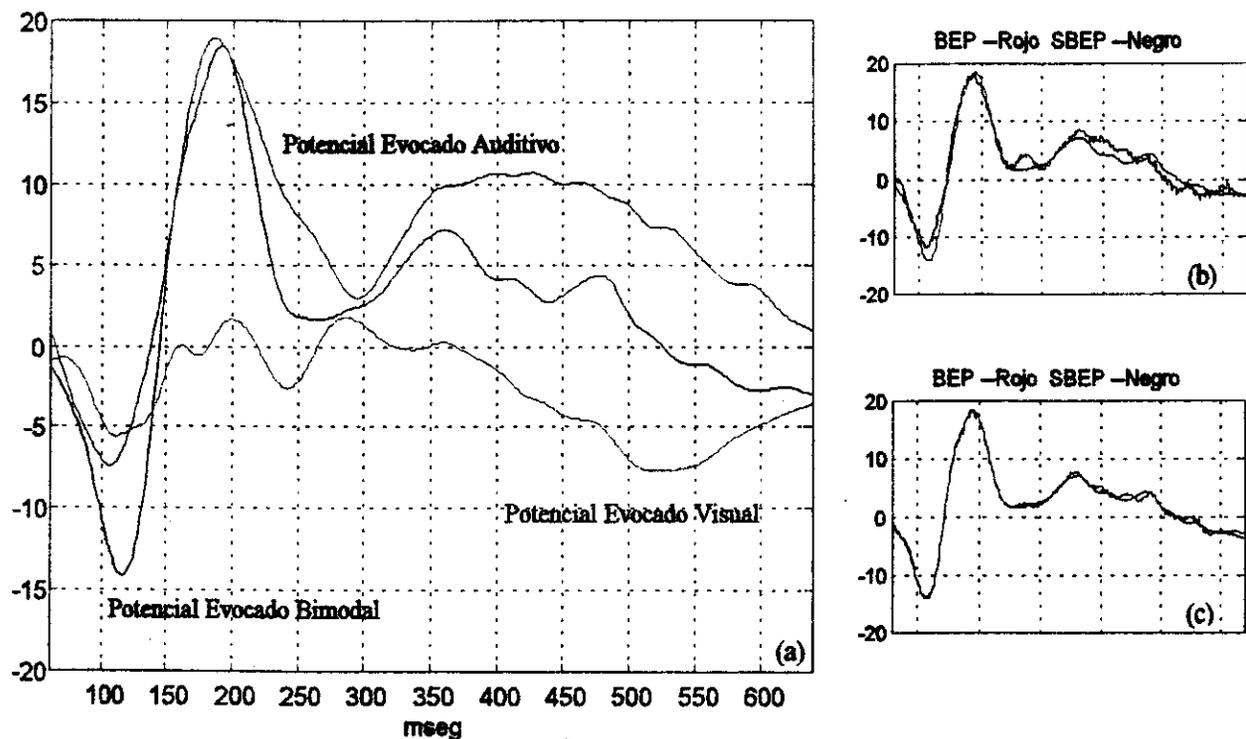


Figura VIII.6.2. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

VIII.6.1. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

El análisis espacial es realizado utilizando la información de los electrodos F3, Fz, F4, C3, C4,

P3, Pz y P4. Con el propósito de entender el fenómeno que ocurre durante la tarea de filtrado la representación vertical de las actividades unimodales y bimodal se presenta en la figura VIII.6.3. El componente auditivo N100 parece tener simetría mientras que el componente P200 esta ligeramente lateralizado hacia la izquierda, la actividad cognoscitiva se encuentra ligeramente lateralizada hacia el hemisferio izquierdo. La representación visual indica una simetría de sus componentes, con un componente N400 localizado en el vertex. El componente bimodal N100 parece tener una

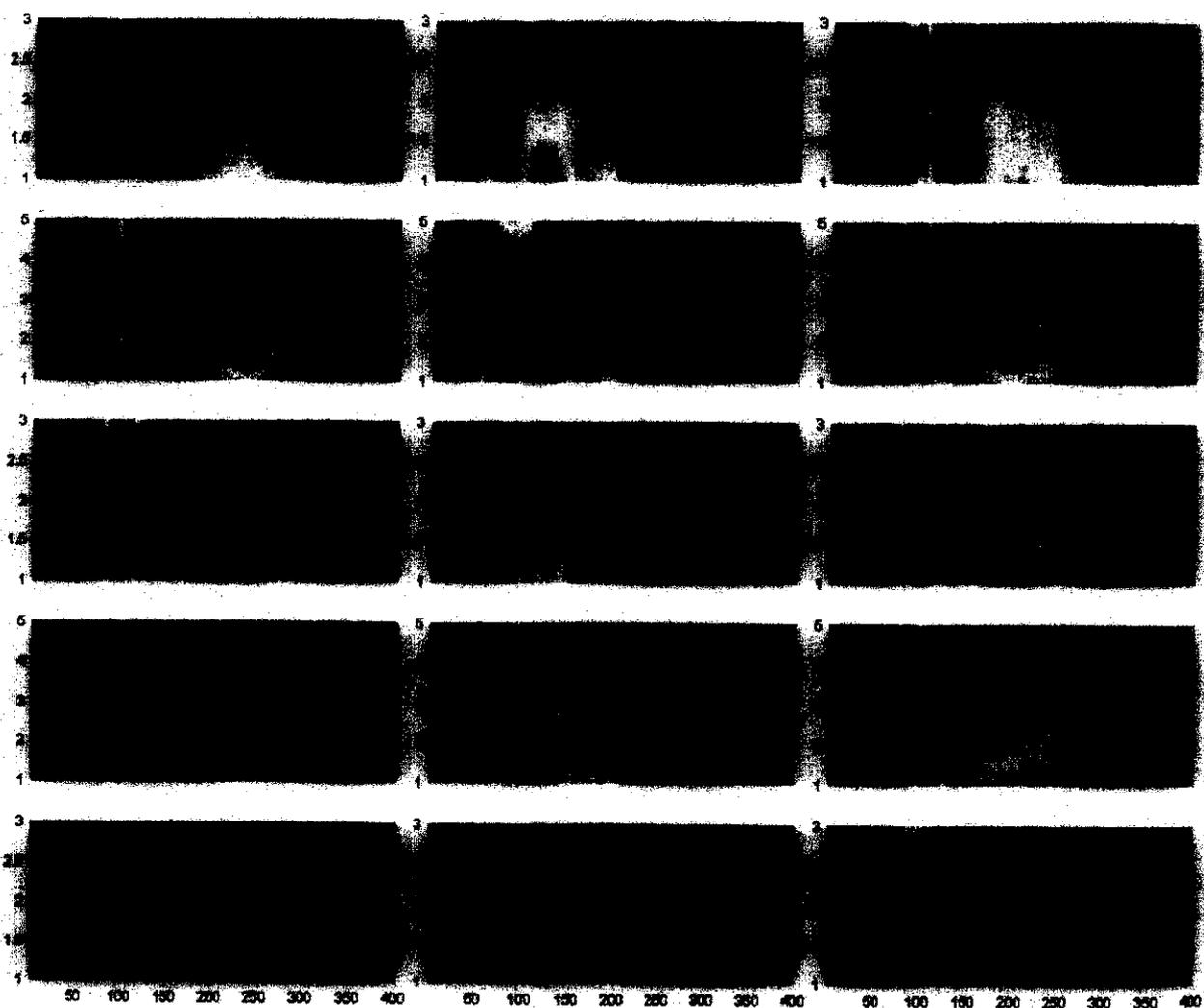


Figura VIII.6.3. Representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos F8, T4 y T6 del sistema 10-20.

lateralización izquierda mientras que el componente P200 muestra una distribución simétrica. El componente bimodal P300 muestra una actividad más intensa en la región parietal con una lateralización izquierda.

En la figura VIII.6.4-6 se muestran los mapas topográficos de la actividad unimodal y bimodal. En el caso auditivo, figura VIII.6.4, se muestra un componente negativo bien definido alrededor de los 100 milisegundos con una distribución localizada en el vertex. El componente visual N100, figura VIII.6.5, tiene una menor amplitud que el componente auditivo N100 y está localizado en el vertex. Para el caso bimodal, el componente N100 no parece seguir a la actividad auditiva o a

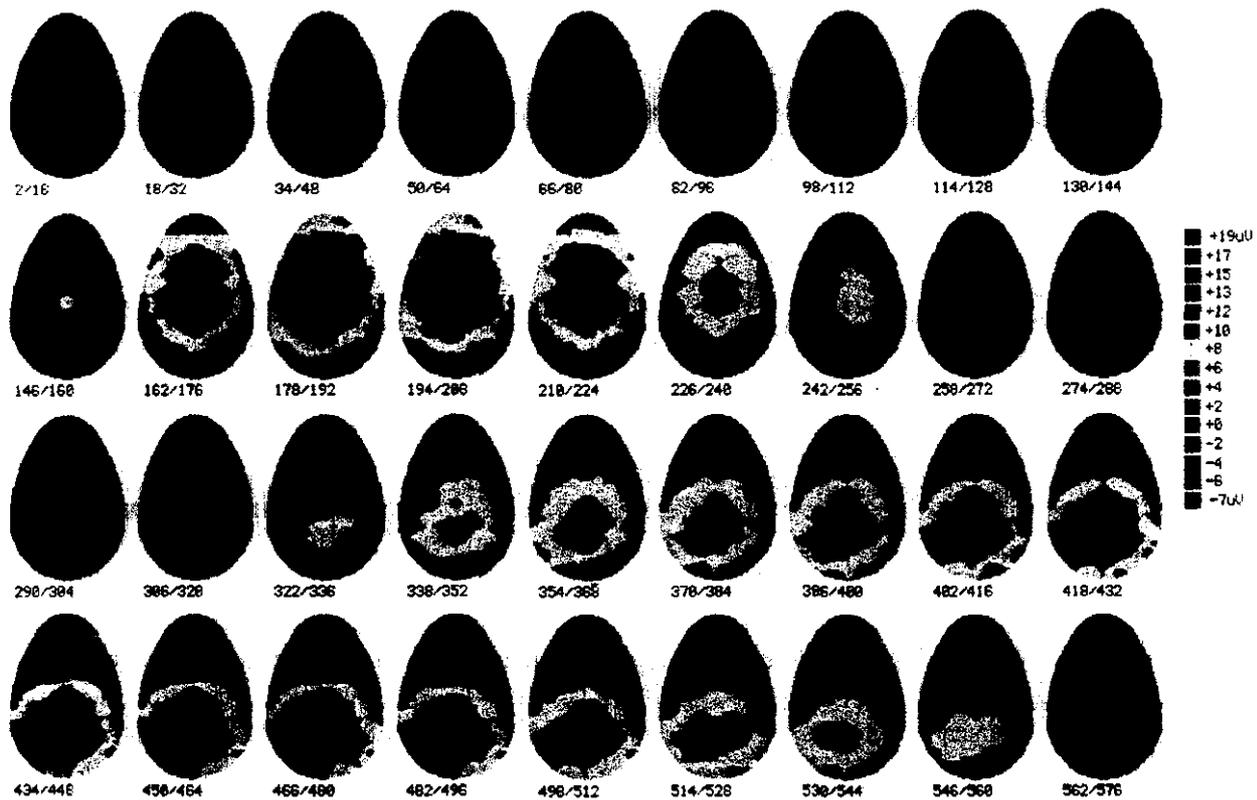


Figura VIII.6.4. Distribución espacial del potencial evocado auditivo, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

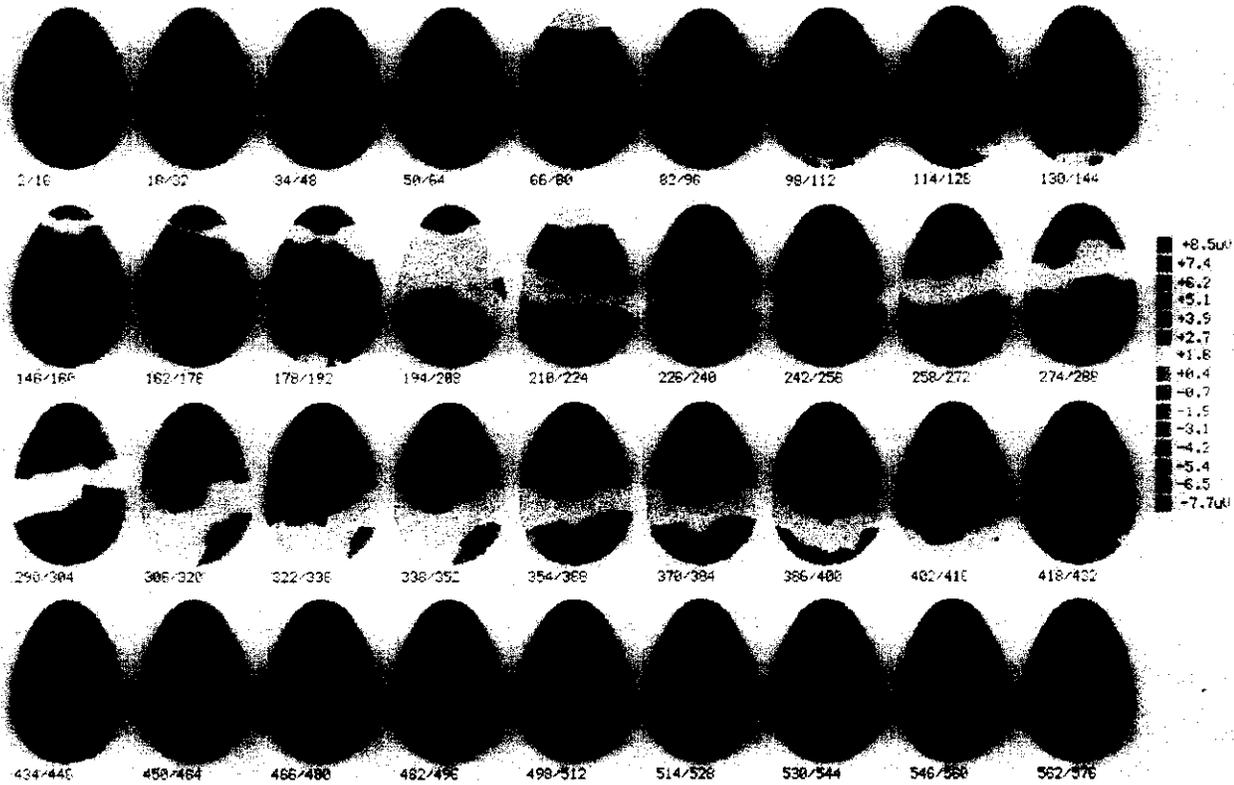


Figura VIII.6.5. Distribución espacial del potencial evocado visual, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

la actividad visual, sugiriendo que el componente bimodal es la combinación de las actividades unimodales. El fenómeno de "switch" no sigue la distribución espacial encontrada en los anteriores experimentos, figura VIII.6.7. Parece ser que a además de los procesos de detección de los estímulos unimodales ocurre un proceso adicional y que posiblemente se asocie con los procesos de categorización de los estímulos. El componente auditivo P200 muestra una distribución fronto-central, siendo más intenso en la región del vertex mientras que el componente P200 visual esta principalmente localizado en la región parietal. En contraste, el componente bimodal tiene una distribución más amplia que cualquier de los estímulos unimodales. La actividad eléctrica de la figura

VIII.6.6, de los 210 a los 224 milisegundos, asociada con la interacción entre la categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, presenta una amplia distribución en comparación con los experimentos anteriores. La parte cognoscitiva bimodal indica que se desarrolla alguna actividad positiva en la parte parietal que se asemeja a la actividad cognoscitiva auditiva, sin embargo los mapas topográficos bimodales no revelan la influencia del componente visual N400.

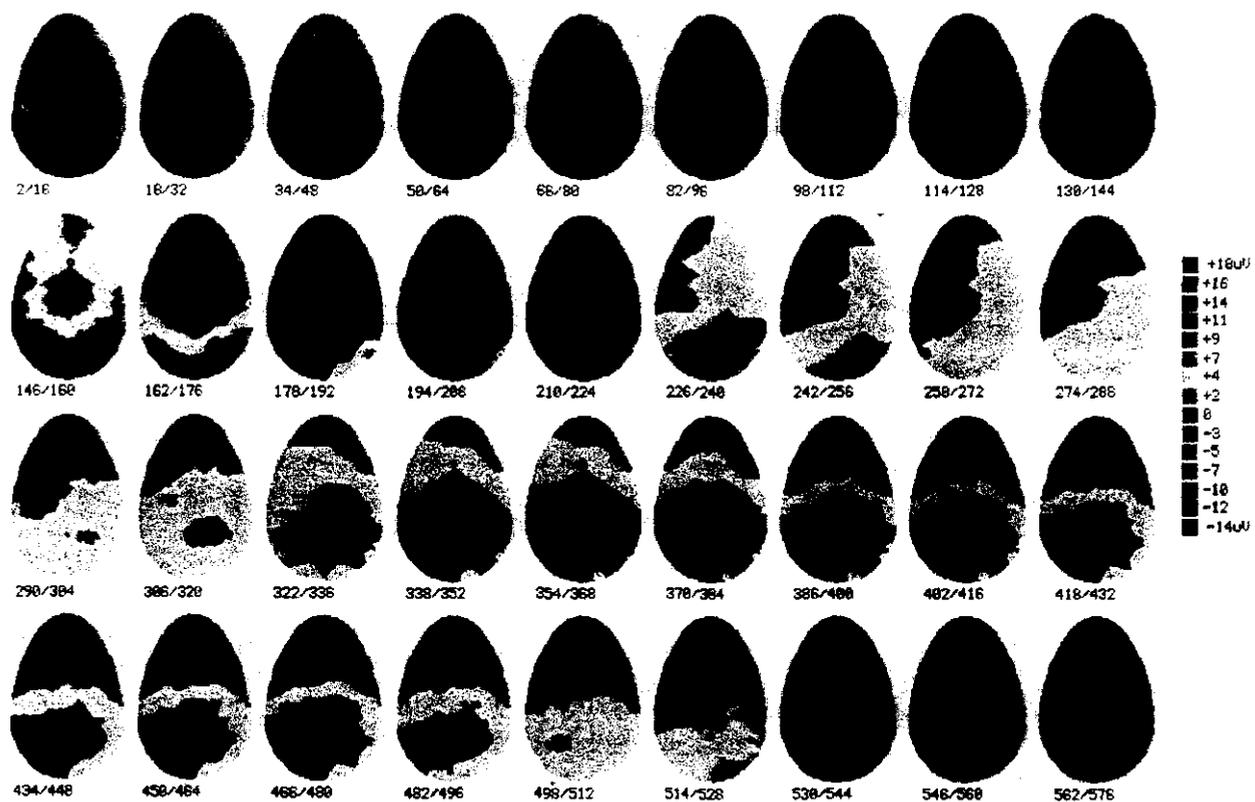


Figura VIII.6.6. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

En los experimentos anteriores se definieron tres ventanas de análisis, sin embargo, en el presente experimento y considerando que la tarea del sujeto es responder al estímulo infrecuente se

definen dos ventanas de análisis. La primera ventana incluye los procesos de detección y categorización de los estímulos con una terminación indexada por el componente auditivo N200, mientras que la segunda ventana de análisis incluye los procesos de cierre unimodales y bimodal.

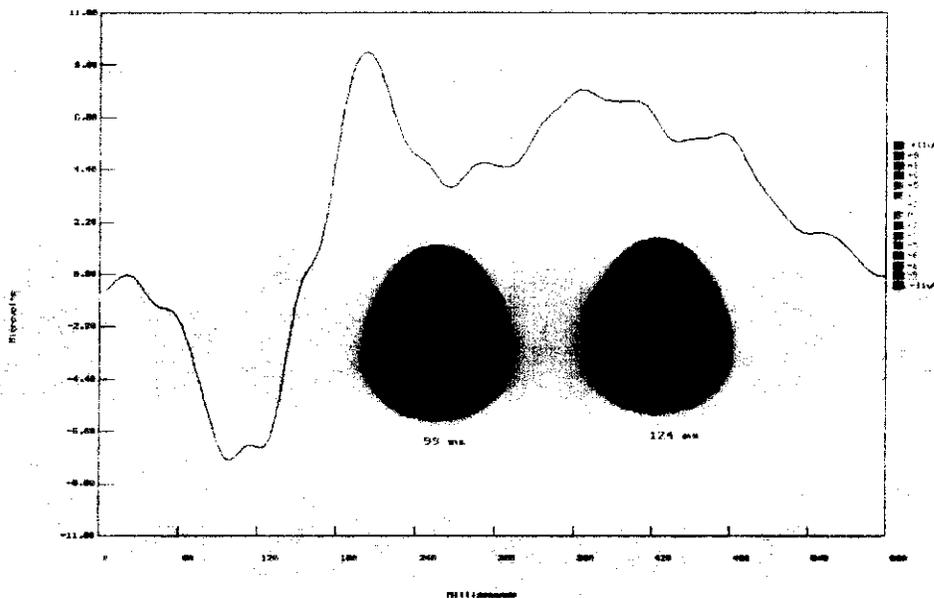


Figura VIII.6.7. Distribución espacial del componente bimodal N100.

VIII.6.2. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal

Las actividades eléctricas consideradas para la primera ventana de análisis se muestran en la figura VIII.6.8. La morfología del componente bimodal N100 en la región fronto-central se aproxima a la morfología del componente auditivo N100. El componente bimodal P200 muestra un corrimiento de latencia, incrementándose de la región frontal a la región parietal, con respecto al componente P200 auditivo. El fenómeno anterior sugiere que los componentes unimodales exógenos auditivos y visuales interfieren con los procesos de categorización de los estímulos, interactuando en forma diferente que en los experimentos anteriores. De hecho, debido al estímulo visual de color azul un componente se genera alrededor de los 175 milisegundos y su efecto se refleja por el cambio de

pendiente del componente bimodal P200, siendo más evidente en la región parietal. Los resultados del modelo, incluidos en las figuras VIII.6.9-11, indican un fenómeno intersensorial que se comporta diferente con respecto a los experimentos anteriores, en donde el fenómeno intersensorial es

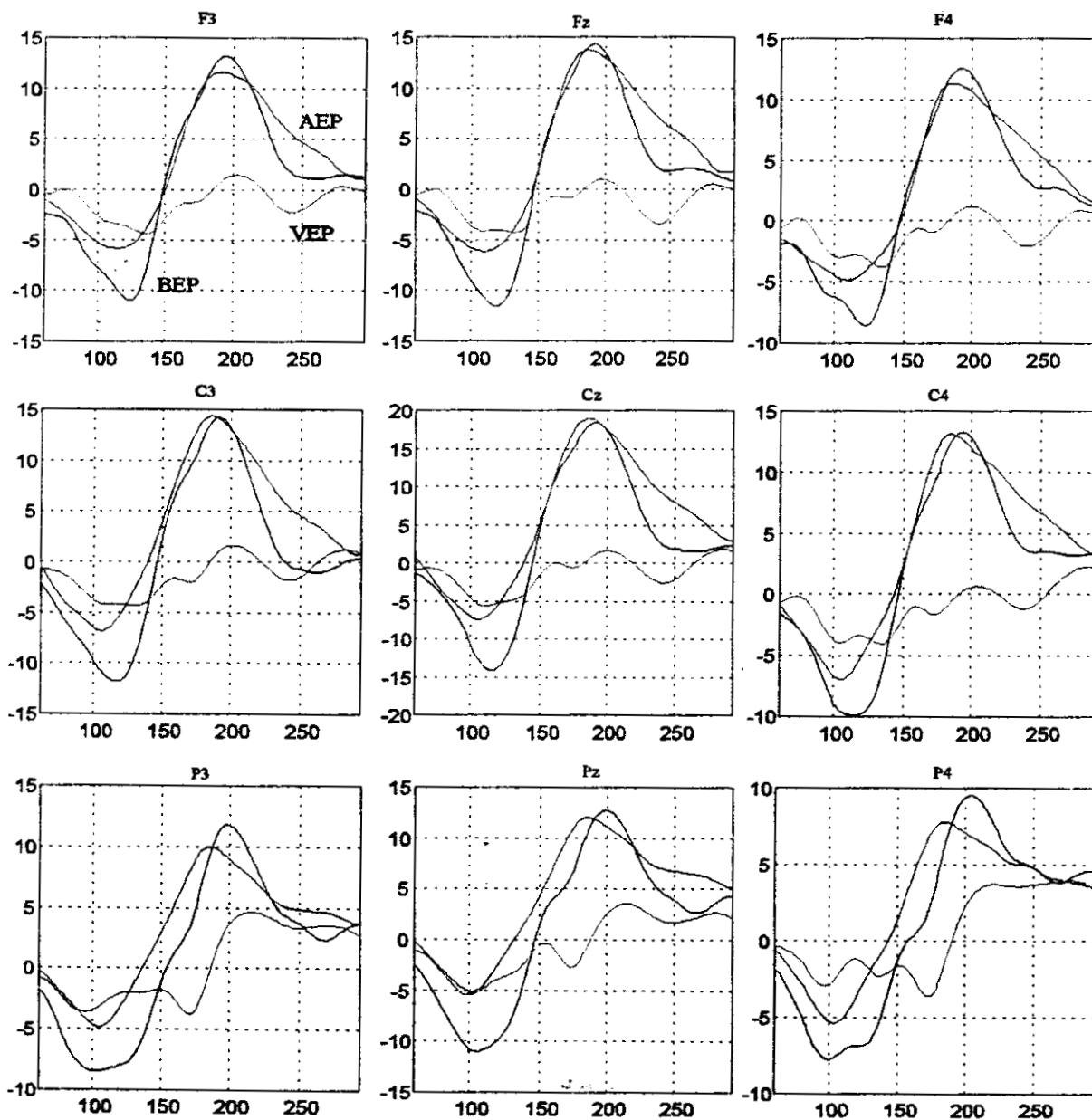


Figura VIII.6.8. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

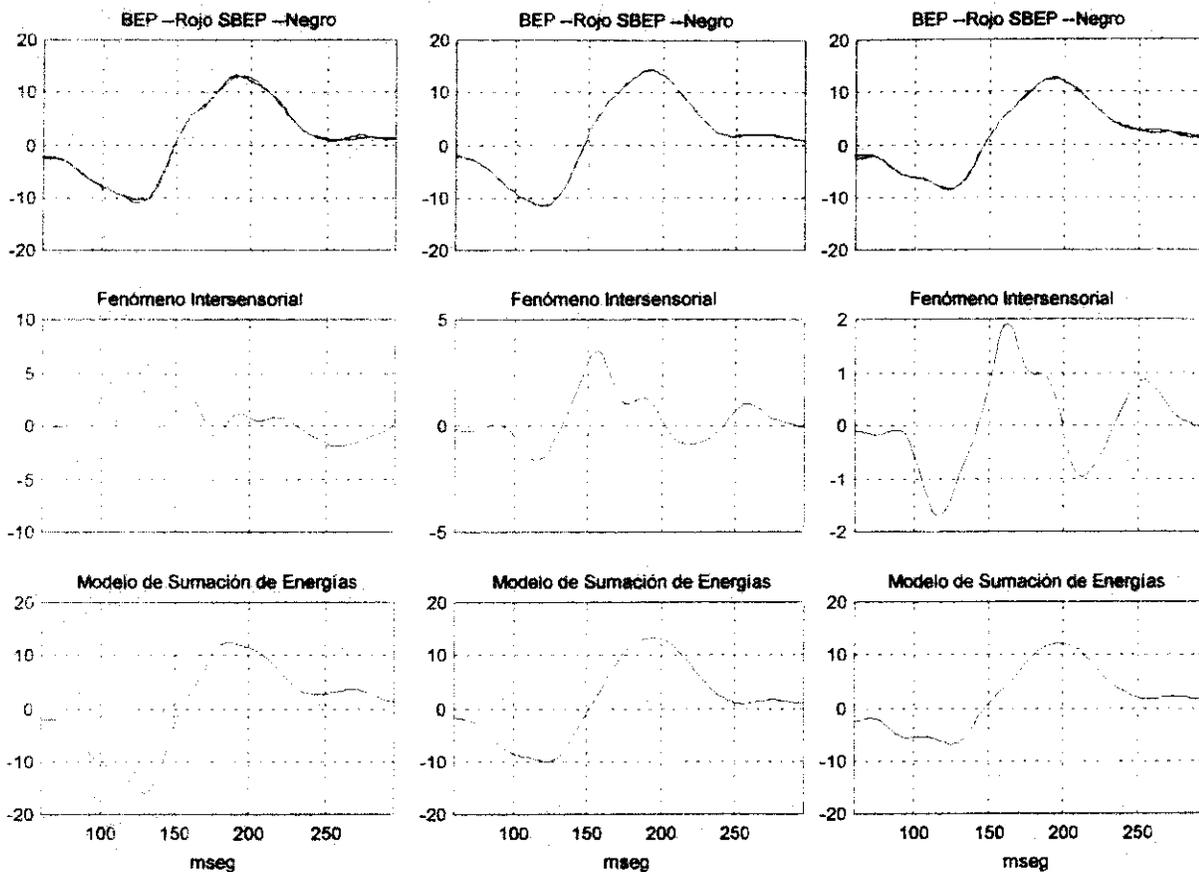


Figura VIII.6.9. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

significativo después del componente bimodal N100. En el presente experimento, parece ser que debido a la baja probabilidad de ocurrencia del estímulo auditivo relevante y a la información del estímulo visual irrelevante se requiere procesamiento adicional originando procesos más complejos que se combinan de una manera no-lineal con los procesos de detección del estímulo. Lo anterior podría explicar el hecho de que el comportamiento del fenómeno de "switch" no se observa claramente en el presente experimento. El fenómeno intersensorial presenta un mayor efecto en la región vertex-parietal afectando tanto los componentes bimodales N100 como P200. Los coeficientes

del modelo se reportan en la tabla VIII.6.1.

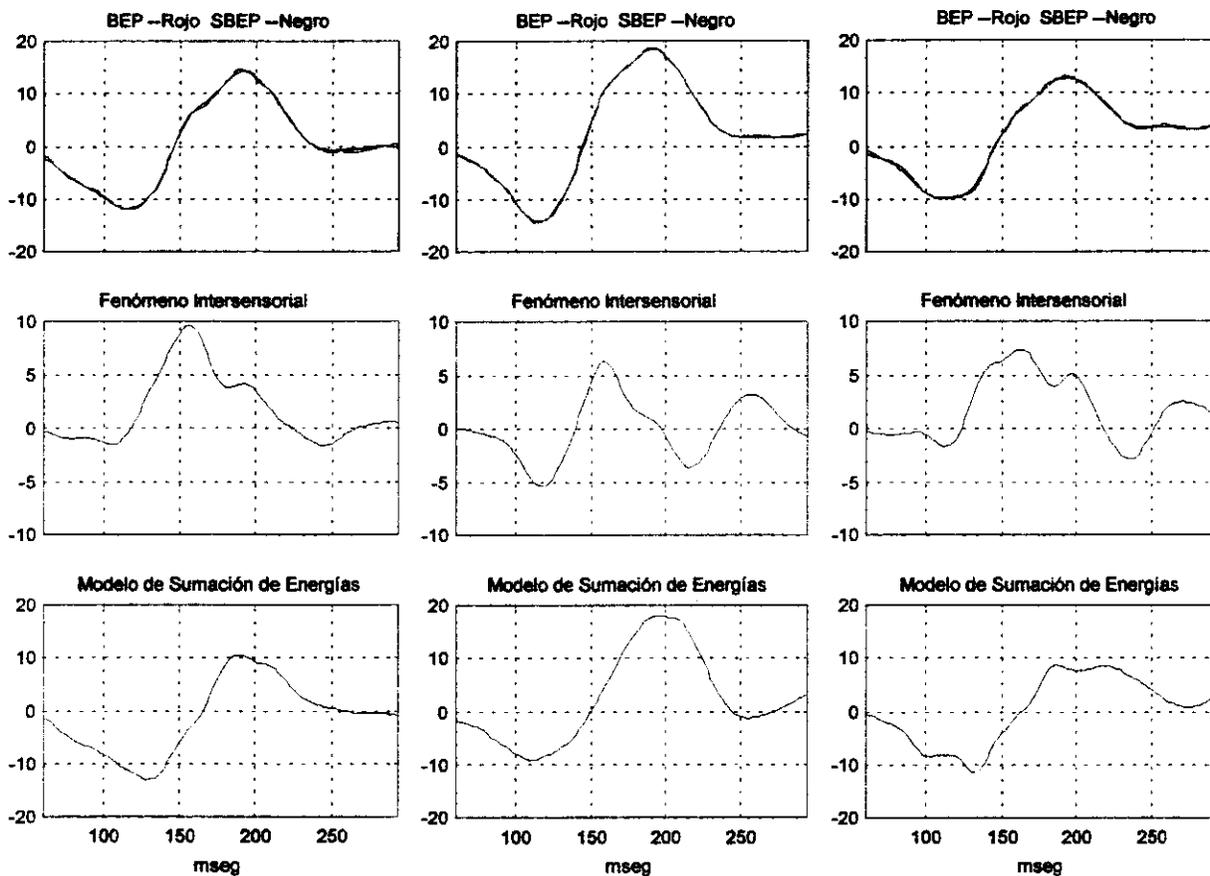


Figura VIII.6.10. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

TABLA VIII.6.1
Coefficientes del Modelo No-Linear para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3		Cz	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+1.276	$u_A(n-1)$	+0.033	$u_A(n-1)$	+1.028	$u_A(n-1)$	+1.023	$u_A(n-2)$	+0.380	$u_A(n-1)$
+1.588	$u_V(n-1)$	-0.207	$u_A(n-15)$	-0.445	$u_A(n-12)$	-0.589	$u_A(n-15)$	-0.412	$u_A(n-15)$
+0.285	$u_A(n-1) u_V(n-1)$	+1.217	$u_V(n-1)$	+1.387	$u_V(n-1)$	+0.334	$u_V(n-1)$	+1.385	$u_V(n-1)$
-0.188	$u_A(n-1) u_V(n-4)$	+0.147	$u_V(n-15)$	+0.470	$u_V(n-12)$	-0.375	$u_A(n-1) u_V(n-10)$	+1.065	$u_V(n-12)$
-0.116	$u_A(n-11) u_A(n-13)$	-0.204	$u_A(n-1) u_V(n-7)$	-0.142	$u_A(n-2) u_V(n-9)$	+0.182	$u_A(n-6) u_V(n-9)$	+0.044	$u_A(n-1) u_A(n-2)$

TABLA VIII.6.1 (Cont.)

+0.153	$u_A(n-13)u_V(n-15)$	+0.133	$u_A(n-8)u_V(n-5)$	-0.036	$u_A(n-3)u_V(n-1)$	+0.022	$u_A(n-14)u_A(n-15)$	-0.090	$u_A(n-1)u_V(n-6)$
+0.074	$u_A(n-14)u_A(n-15)$	+0.015	$u_A(n-12)u_A(n-13)$	+0.034	$u_A(n-8)u_A(n-12)$	+0.137	$u_A(n-15)u_V(n-7)$	-0.056	$u_A(n-1)u_V(n-11)$
+0.040	$u_A(n-15)u_V(n-4)$	-0.181	$u_V(n-1)u_V(n-11)$	+0.062	$u_A(n-12)u_V(n-6)$	-0.133	$u_V(n-1)u_V(n-6)$	-0.054	$u_A(n-3)u_V(n-15)$
-0.981	$u_V(n-2)u_V(n-10)$	-0.862	$u_V(n-1)u_V(n-12)$	-0.251	$u_V(n-1)u_V(n-12)$	-0.138	$u_V(n-2)u_V(n-15)$	-0.205	$u_A(n-8)u_A(n-9)$
+0.912	$u_V(n-5)u_V(n-11)$	+0.308	$u_V(n-1)u_V(n-15)$	+0.324	$u_V(n-5)u_V(n-6)$	-0.482	$u_V(n-14)u_V(n-15)$	+0.215	$u_A(n-9)u_A(n-10)$
		+0.964	$u_V(n-2)u_V(n-10)$					-0.423	$u_V(n-1)u_V(n-9)$
		-0.120	$u_V(n-5)u_V(n-6)$					+0.488	$u_V(n-2)u_V(n-10)$
		-0.171	$u_V(n-10)u_V(n-11)$						

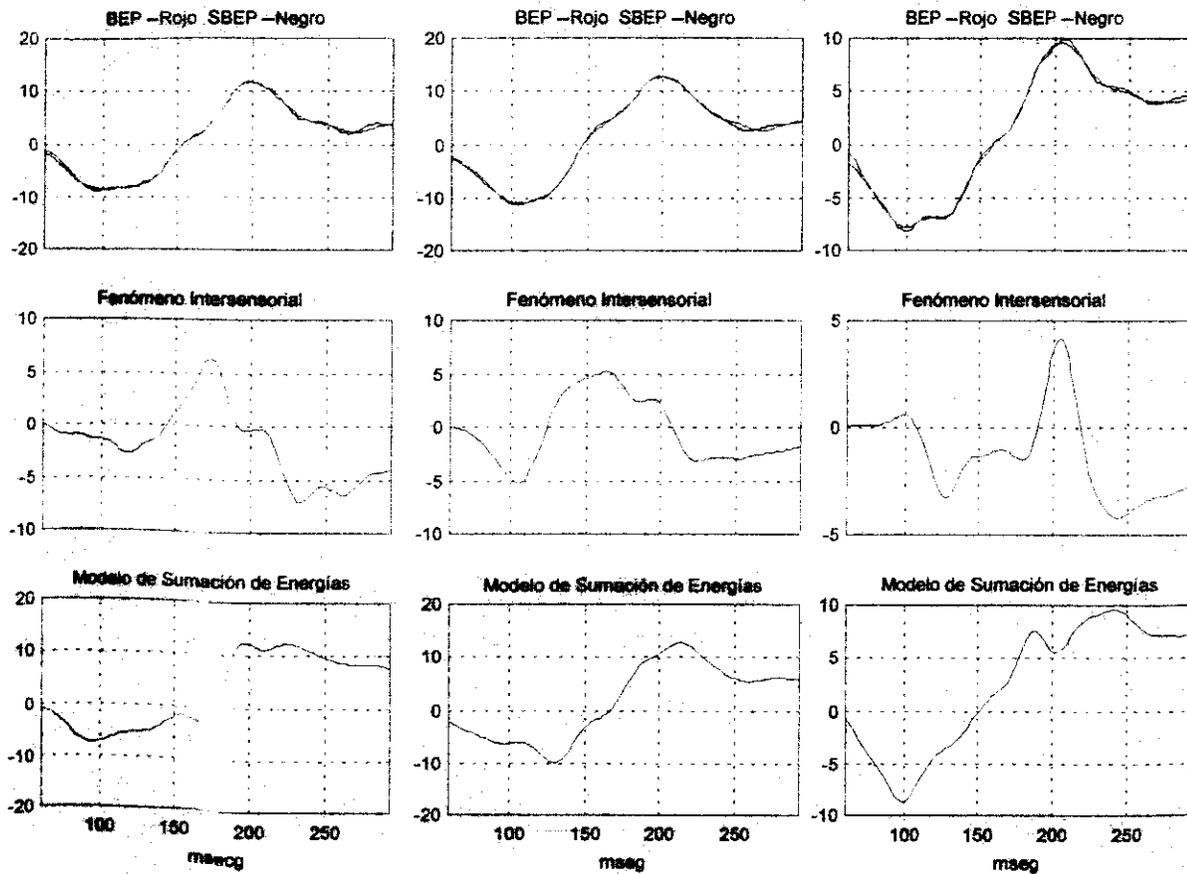


Figura VIII.6.11. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLA VIII.6.1 (Cont.)							
C4		P3		Pz		P4	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.556	$u_A(n-2)$	-0.134	$u_A(n-1)$	-0.947	$u_A(n-6)$	+1.618	$u_A(n-1)$
-0.173	$u_V(n-1)$	+0.894	$u_A(n-7)$	+1.883	$u_V(n-1)$	0.738	$u_A(n-8)$
+1.455	$u_V(n-13)$	+1.296	$u_V(n-1)$	+1.139	$u_V(n-11)$	+0.284	$u_V(n-1)$
-0.208	$u_A(n-1)u_V(n-6)$	-1.102	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.144	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+1.347	$u_V(n-13)$
-0.187	$u_A(n-3)u_V(n-13)$	+0.339	$u_A(n-2)u_V(n-9)$	-0.086	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.409	$u_A(n-1)u_V(n-2)$
+0.019	$u_A(n-5)u_A(n-6)$	+1.336	$u_A(n-4)u_V(n-1)$	-0.249	$u_A(n-2)u_V(n-13)$	-0.287	$u_A(n-1)u_V(n-15)$
+0.311	$u_A(n-13)u_V(n-4)$	-0.519	$u_A(n-5)u_V(n-15)$	+0.137	$u_A(n-15)u_V(n-11)$	+0.294	$u_A(n-2)u_V(n-15)$
-0.823	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	-0.329	$u_A(n-8)u_V(n-6)$	-0.276	$u_V(n-1)u_V(n-11)$	+0.087	$u_A(n-3)u_A(n-10)$
+0.869	$u_V(n-1)u_V(n-7)$	-0.142	$u_A(n-13)u_V(n-13)$	+0.236	$u_V(n-6)u_V(n-8)$	-0.387	$u_A(n-3)u_V(n-1)$
-0.968	$u_V(n-5)u_V(n-12)$	-0.773	$u_A(n-15)u_V(n-4)$			-0.200	$u_A(n-15)u_V(n-15)$
0.667	$u_V(n-7)u_V(n-13)$	+0.814	$u_A(n-15)u_V(n-4)$			-0.238	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
		-0.113	$u_V(n-1)u_V(n-2)$				
		-0.110	$u_V(n-9)u_V(n-15)$				
		+0.249	$u_V(n-10)u_V(n-13)$				

En la segunda ventana de análisis se muestran los procesos de cierre unimodales y bimodales, figura VIII.6.12. En esta ventana se observa una actividad cognoscitiva bimodal bien definida, información parcial del proceso cognoscitivo auditivo y el inicio de un componente visual negativo. La actividad bimodal inicia siguiendo la actividad cognoscitiva auditiva, sin embargo, en forma repentina existe un decremento en su actividad. Es importante observar que el componente visual N400 inicia alrededor del punto de inflexión de la actividad bimodal, parece ser que la onda negativa visual "obliga" a terminar el proceso cognoscitivo bimodal, evitando seguir por más tiempo a la actividad auditiva. El modelo no-lineal, figuras VIII.6.13-15, muestra que tanto las contribuciones lineales y no-lineales son importantes para explicar la génesis de la actividad bimodal. Los resultados

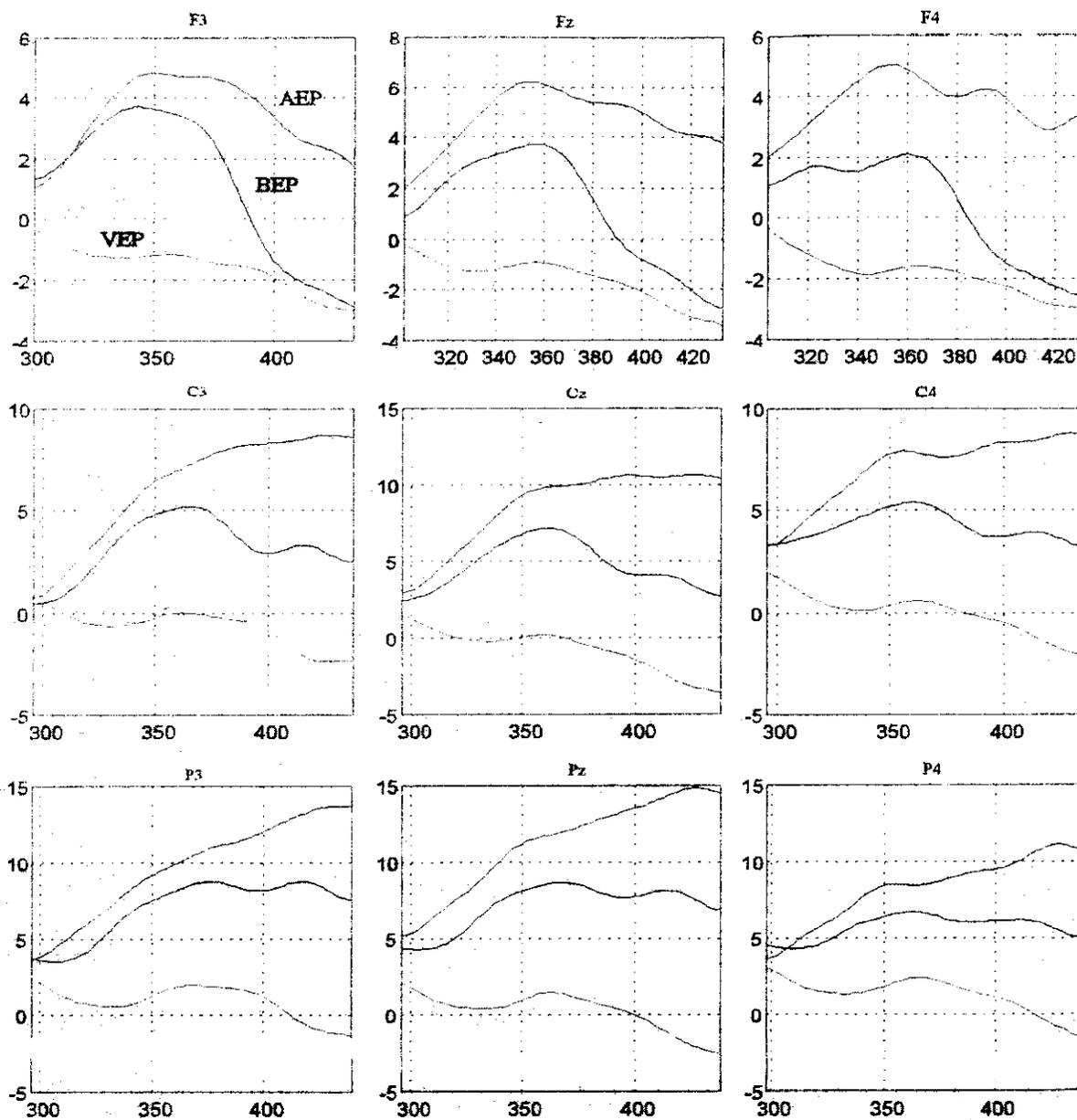


Figura VII.6.12. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

obtenidos para el electrodo Cz soportan el hecho de que la información visual interfiere el proceso cognoscitivo auditivo en una manera no-lineal, tanto el fenómeno intersensorial y el componente N400 inician a disminuir su actividad alrededor de la misma latencia. Los resultados sugieren que en un paradigma de filtrado el sujeto no puede evitar la información de la trayectoria sensorial

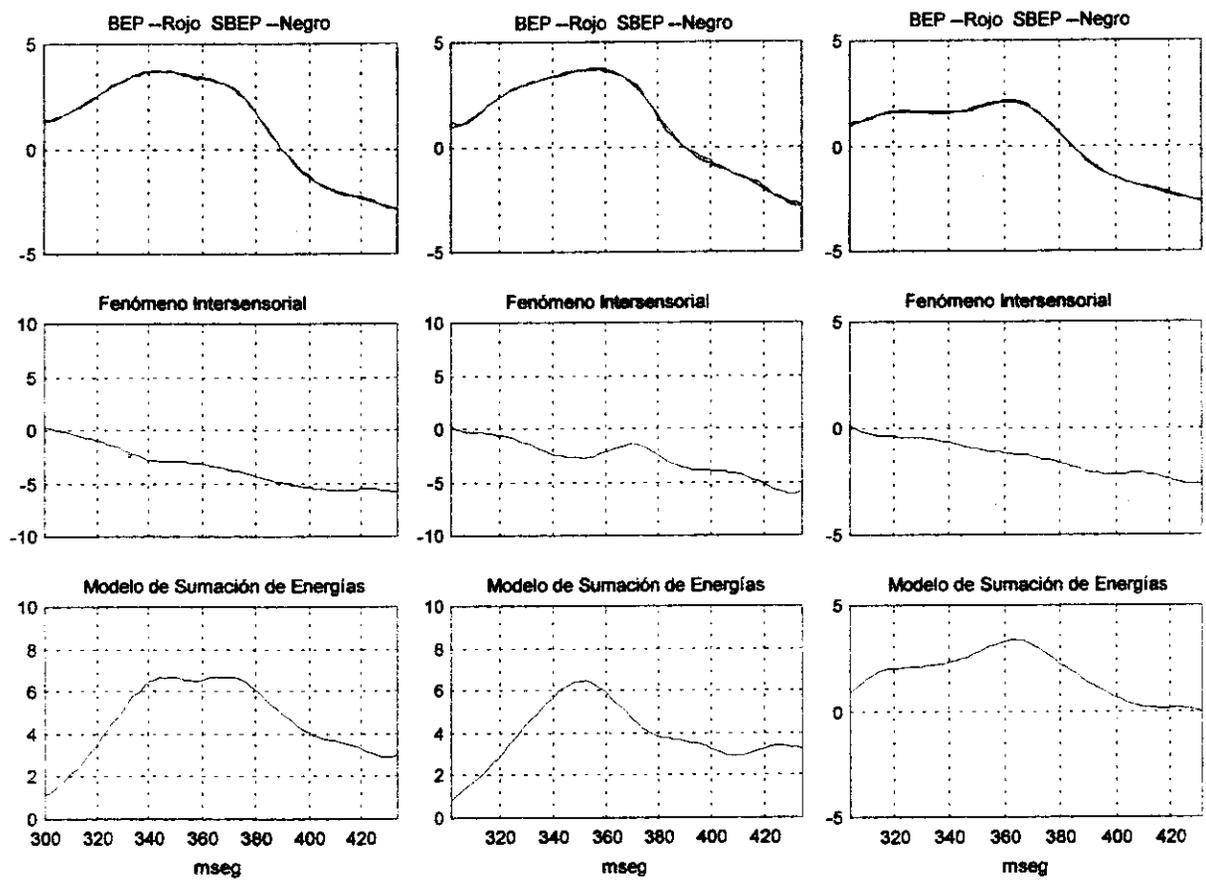


Figura VIII.6.13. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

irrelevante. El fenómeno intersensorial, obtenido en el presente experimento, podría explicar el hecho de contar con un tiempo de reacción bimodal más rápido que el tiempo de reacción unimodal. Los coeficientes del modelo NARX son presentados en la tabla VIII.6.2.

TABLA VIII.6.2
Coeficientes del Modelo No-Lineal para la Segunda Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3		Cz	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.654	$u_A(n-7)$	+1.622	$u_V(n-14)$	+0.338	$u_A(n-1)u_A(n-11)$	+0.271	$u_A(n-1)$	+0.988	$u_A(n-1)$
-0.365	$u_V(n-1)$	+0.159	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.060	$u_A(n-1)u_A(n-18)$	+1.047	$u_A(n-10)$	-0.135	$u_A(n-1)u_A(n-18)$

TABLA VIII.6.2 (Cont.)

+0.873	$u_A(n-16)$	+0.305	$u_A(n-2)u_A(n-11)$	-0.130	$u_A(n-5)u_A(n-7)$	-0.092	$u_A(n-1)u_A(n-16)$	+0.431	$u_A(n-1)u_A(n-1)$
+0.987	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.301	$u_A(n-3)u_A(n-15)$	+0.215	$u_A(n-20)u_A(n-4)$	+0.446	$u_A(n-2)u_A(n-9)$	+0.002	$u_A(n-9)u_A(n-16)$
-0.837	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.594	$u_A(n-6)u_A(n-15)$	-1.045	$u_A(n-1)u_A(n-20)$	-0.234	$u_A(n-3)u_A(n-5)$	-0.352	$u_A(n-11)u_A(n-1)$
+0.589	$u_A(n-8)u_A(n-1)$	-1.269	$u_A(n-14)u_A(n-14)$	+1.367	$u_A(n-12)u_A(n-17)$	-0.590	$u_A(n-13)u_A(n-2)$	+0.088	$u_A(n-12)u_A(n-13)$
+0.148	$u_A(n-8)u_A(n-11)$	+1.051	$u_A(n-15)u_A(n-9)$	-0.473	$u_A(n-13)u_A(n-14)$	+0.037	$u_A(n-14)u_A(n-15)$	+0.087	$u_A(n-1)u_A(n-2)$
-0.039	$u_A(n-12)u_A(n-6)$	+0.537	$u_A(n-5)u_A(n-6)$			-0.178	$u_A(n-15)u_A(n-16)$	-0.863	$u_A(n-1)u_A(n-12)$
-0.832	$u_A(n-17)u_A(n-15)$					-0.149	$u_A(n-15)u_A(n-16)$	+0.637	$u_A(n-4)u_A(n-8)$
+0.806	$u_A(n-20)u_A(n-14)$					+0.478	$u_A(n-16)u_A(n-1)$	+0.107	$u_A(n-5)u_A(n-18)$
-0.419	$u_A(n-9)u_A(n-19)$								
+1.016	$u_A(n-16)u_A(n-17)$								

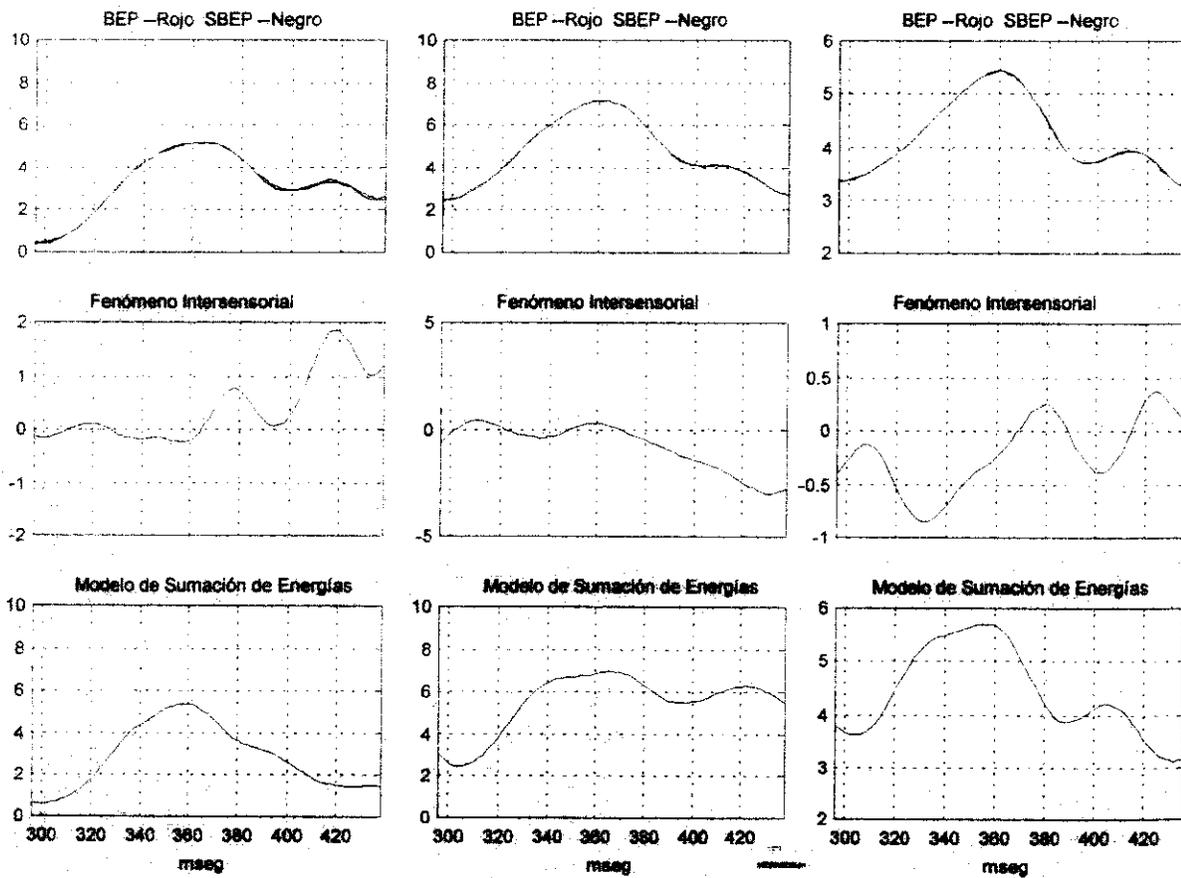


Figura VIII.6.14. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

- 1)
- 16)
- 1)
- 13)
- 2)
- 12)
- 8)
- 18)

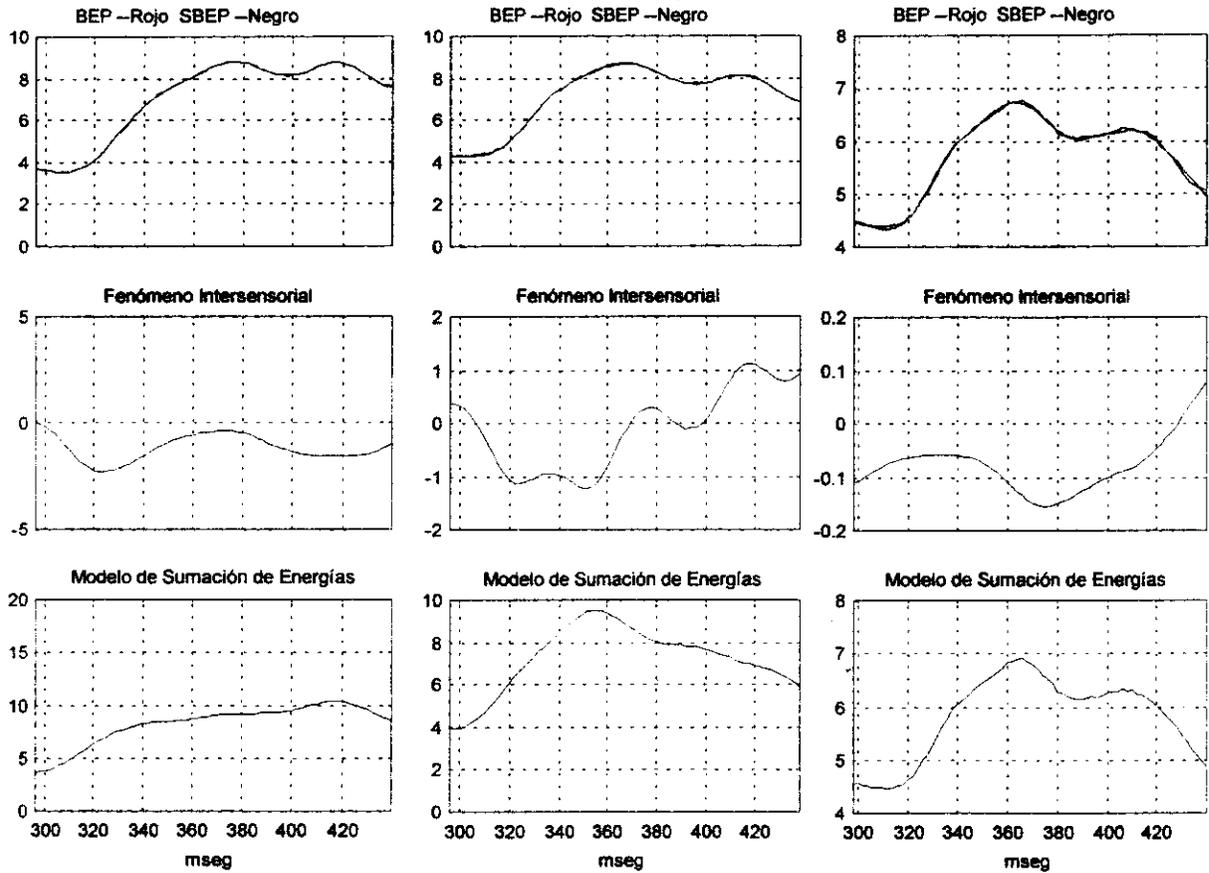


Figura VIII.6.15. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLA VIII.6.2 (Cont.)							
C4		P3		Pz		P4	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.730	$u_A(n-1)$	+0.935	$u_A(n-1)$	+1.296	$u_A(n-1)$	+0.450	$u_A(n-1)$
-0.021	$u_A(n-3)$	+0.575	$u_A(n-6)$	-0.913	$u_A(n-17)$	+0.433	$u_A(n-12)$
+0.572	$u_A(n-9)$	-0.045	$u_A(n-17)$	+0.090	$u_A(n-18)$	+0.541	$u_V(n-1)$
+0.484	$u_V(n-1)$	-0.704	$u_A(n-18)$	+0.737	$u_V(n-1)$	+0.429	$u_A(n-1)u_A(n-18)$
-0.093	$u_A(n-1)u_A(n-16)$	-0.741	$u_V(n-1)$	-0.191	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.509	$u_A(n-2)u_A(n-18)$
+0.003	$u_A(n-2)u_V(n-2)$	+0.439	$u_V(n-6)$	+0.186	$u_A(n-1)u_V(n-4)$	+0.078	$u_A(n-5)u_V(n-18)$
+0.133	$u_A(n-4)u_V(n-3)$	+0.713	$u_V(n-8)$	-0.138	$u_A(n-1)u_V(n-17)$	+0.018	$u_A(n-7)u_A(n-16)$

TABLA VIII.6.2 (Cont.)

-0.181	$u_A(n-8)u_v(n-16)$	-0.232	$u_A(n-1)u_v(n-18)$	-0.153	$u_A(n-5)u_v(n-18)$	-0.008	$u_A(n-9)u_v(n-6)$
+0.053	$u_A(n-10)u_A(n-12)$	+0.004	$u_A(n-9)u_v(n-18)$	+0.165	$u_A(n-11)u_v(n-17)$	-0.052	$u_A(n-15)u_A(n-16)$
-0.056	$u_A(n-11)u_A(n-13)$	-0.014	$u_A(n-11)u_A(n-14)$	+0.216	$u_v(n-2)u_v(n-16)$		
+0.247	$u_A(n-15)u_v(n-4)$	+0.187	$u_A(n-13)u_v(n-17)$				
-0.514	$u_A(n-16)u_v(n-4)$	+0.126	$u_v(n-2)u_v(n-17)$				
+0.244	$u_A(n-16)u_v(n-10)$	-0.128	$u_v(n-7)u_v(n-8)$				

VIII.7. Experimento # 6

El paradigma del sexto experimento incluye la presentación de imágenes y sonidos en lugar de tonos y flashes con el propósito de exponer al sujeto a un estímulo más complejo y también con el propósito de establecer una relación natural entre el estímulo auditivo y el visual. La tarea del sujeto es presionar un botón, lo más rápido posible, cuando la imagen o el sonido corresponda a un pájaro o cuando ambos estímulos se presenten en forma simultánea. La figura VIII.7.1.(a) presenta los potenciales unimodales y bimodal adquiridos en una ventana de tiempo de 60 a 716 milisegundos. La morfología del potencial evocado bimodal, entre los 60 y 150 milisegundos, es muy similar a la morfología del potencial evocado auditivo, sin embargo, después de los 150 milisegundos parece ser que las actividades de ambas vías interactúan fuertemente para formar la actividad eléctrica bimodal. El segundo pico importante del potencial evocado bimodal, alrededor de los 180 milisegundos, difiere

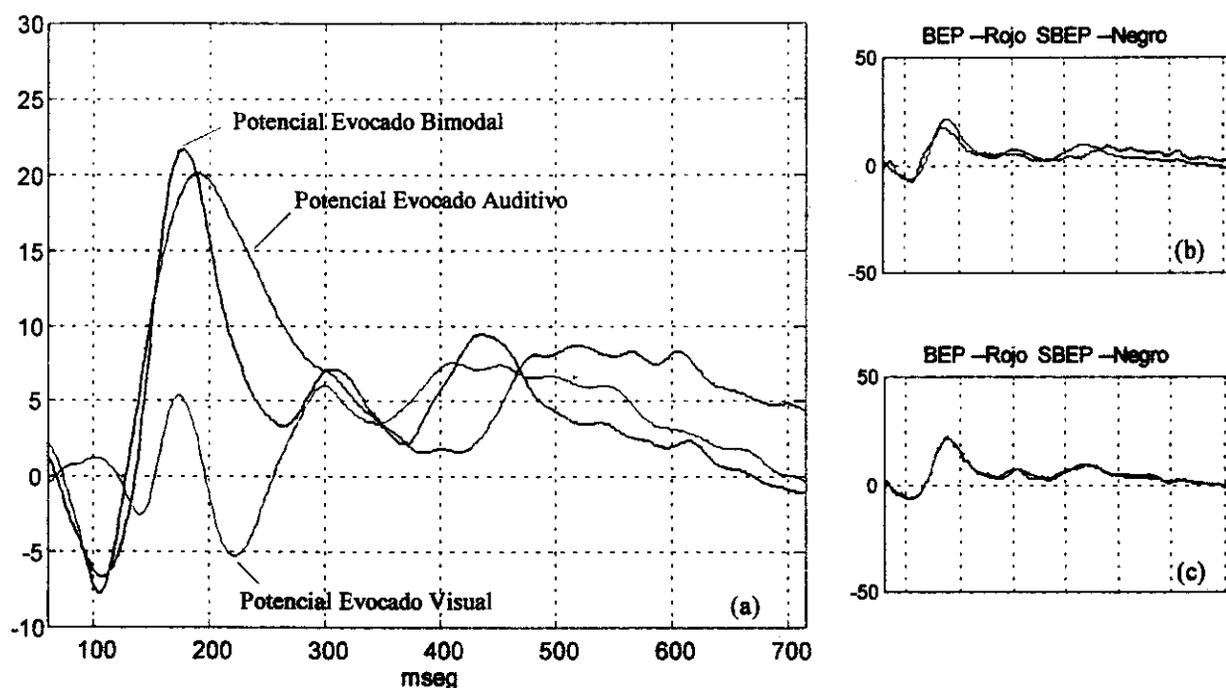


Figura VIII.7.1. (a) Potenciales evocados unimodales y bimodal, (b) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo lineal y (c) potencial evocado bimodal sintetizado por un modelo no-lineal.

de la información auditiva posiblemente debido a que el proceso visual incrementa su energía después de los 150 milisegundos. Es importante observar que el componente bimodal P200 es más simétrico en comparación con la simetría obtenida en experimentos anteriores; la simetría del componente en el sexto experimento puede estar relacionada con la presencia de procesos endógenos más complejos que se generan en forma tardía.

Los potenciales evocados del tercer y sexto experimento, figura VIII.7.2, en donde una tarea dual es asignada, revelan diferencias importantes. La duración del potencial evocado auditivo en el sexto experimento sugiere que los procesos de detección y categorización son más complejos que

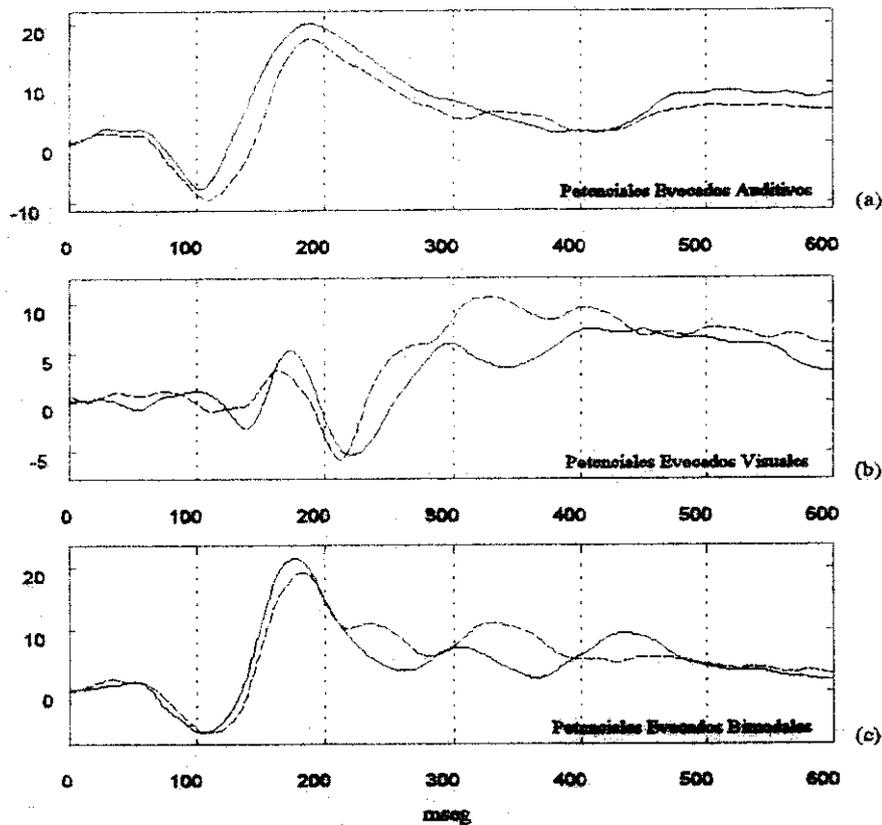


Figura VIII.7.2. Potenciales evocados unimodales y bimodales para el tercer experimento (línea punteada) y para el sexto experimento.

aquellos en el tercer experimento, figura VIII.7.2(a). Los potenciales evocados visuales también muestran diferencias alrededor de los componentes P200 y N200, figura VIII.7.2.(b). Además, los componentes bimodales N100 y P200 están fuera de fase, figura VIII.7.2.(c), mientras que el pico alrededor de los 234 milisegundos en el tercer experimento se retrasa a los 300 milisegundos en el sexto experimento.

VIII.7.1. Modelo No-Lineal Aplicado a la Actividad del Electrodo Cz

Como en los experimentos anteriores, el modelo no-lineal se efectúa para el electrodo Cz y posteriormente se realiza el análisis espacial del fenómeno intersensorial. En la primera ventana de análisis, de los 60 a los 266 milisegundos, es evidente los cambios de pendiente entre el potencial evocado auditivo y bimodal, figura VIII.7.3(a). La pendiente de bajada del componente bimodal P200 decae más rápido que la pendiente de bajada del componente auditivo P200. Los resultados del modelo no-lineal se reportan en la figura VIII.7.4(a)-(e), como puede observarse la morfología del modelo de suma de energías esta más relacionada con el potencial bimodal adquirido, sin embargo, la

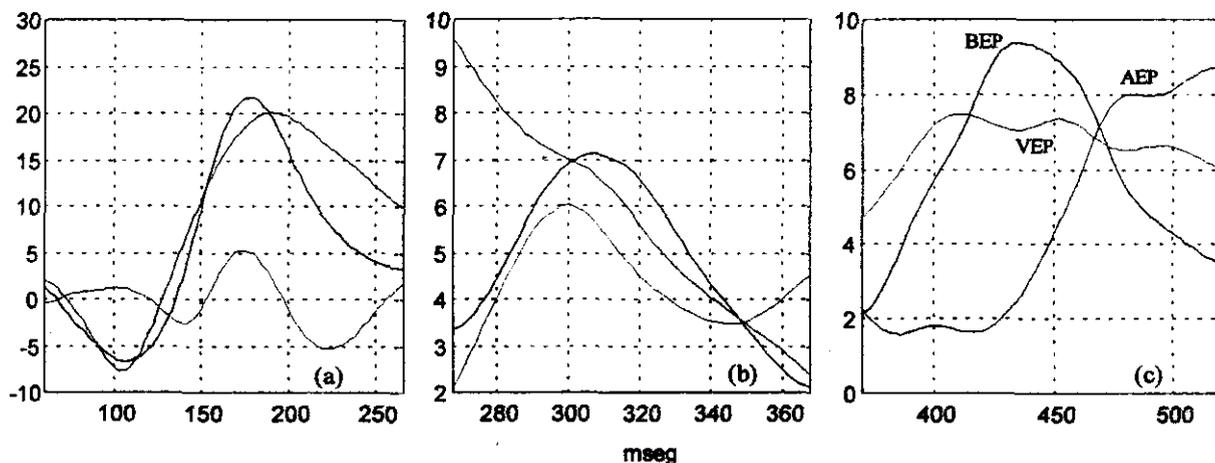


Figura VIII.7.3. Ventanas de tiempo. Se muestra el potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP).

actividad del fenómeno intersensorial es necesaria para explicar completamente el comportamiento de la actividad bimodal. La contribución del fenómeno intersensorial se presenta tanto para el componente bimodal N100 y P200, siendo de mayor amplitud para el componente P200. Parece ser que para el caso bimodal los procesos de detección y categorización de los estímulos auditivo y visual interactúan en forma lineal y no-lineal en una forma constructiva que conduce a procesos de detección y categorización más rápidos. Los coeficientes obtenidos por el modelo no-lineal se reportan en la tabla VIII.7.1.

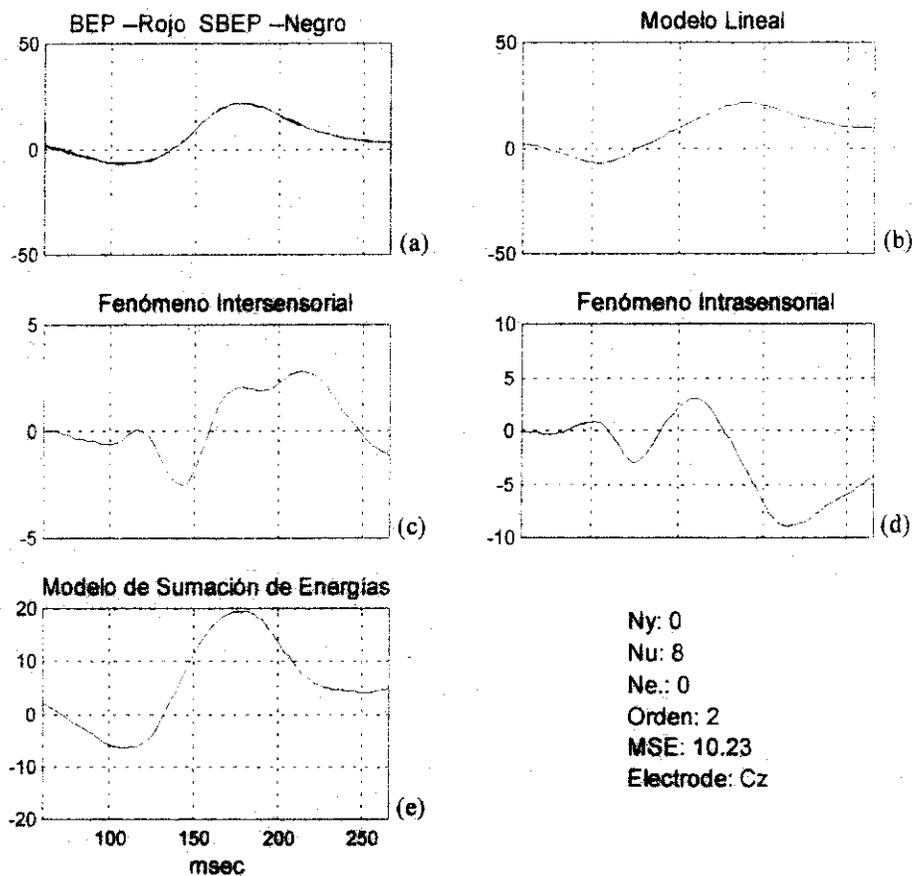


Figura VIII.7.4. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

La segunda ventana de tiempo se define de los 268 a los 368 milisegundos, figura VIII.7.3(b). Esta ventana incluye el proceso de categorización del estímulo auditivo, el proceso de post-categorización del estímulo visual y su interacción reflejada en el potencial evocado bimodal. Los resultados del modelo indican que son importantes las contribuciones lineales y no-lineales para sintetizar la actividad bimodal, figura VIII.7.5(a)-(e). El fenómeno intersensorial, figura VIII.7.5(b), incrementa y decrecienta su actividad en el intervalo de los 268 a los 320 milisegundos

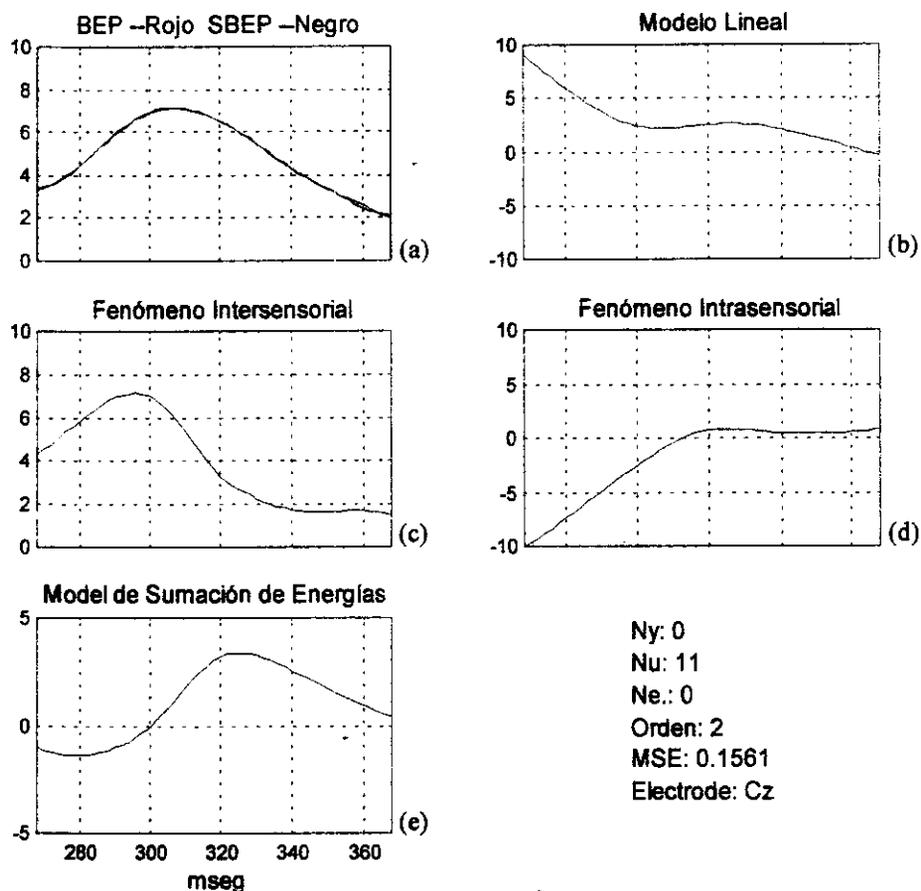


Figura VIII.7.5. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

permaneciendo constante posteriormente. Parece ser que la actividad del potencial bimodal inicia "siguiendo" la morfología del potencial visual y se modifica en los 320 milisegundos por el proceso de categorización del estímulo auditivo para posteriormente "seguir" la morfología del proceso de categorización del estímulo auditivo. En este caso, la morfología del modelo de suma de energías no se ajusta a la morfología del potencial adquirido, sugiriendo la relevancia de la contribución del fenómeno intersensorial.

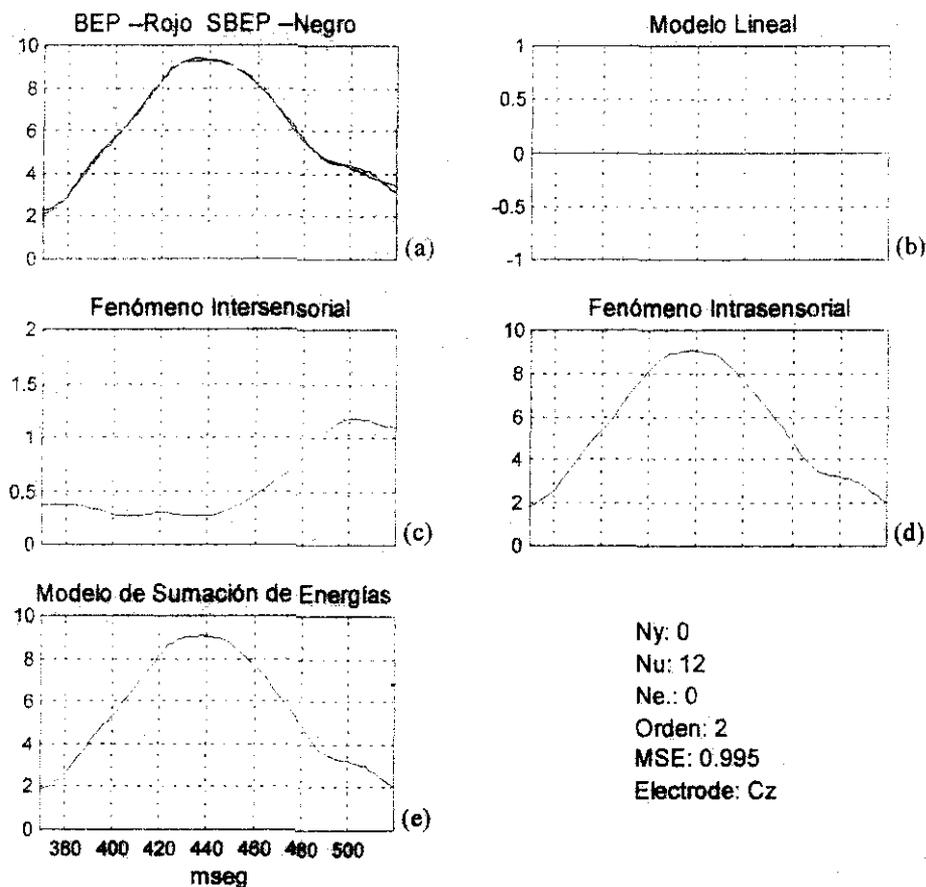


Figura VIII.7.6. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (b) contribución lineal, (c) contribución no-lineal, (d) información obtenida por la interacción entre la trayectoria visual y auditiva, (e) información obtenida por la suma de información de la trayectoria visual y auditiva.

La tercera ventana de tiempo, definida de los 370 a los 520 milisegundos y mostrada en la figura VIII.7.3(c), contiene los procesos de cierre visual y bimodal y además, el inicio de la actividad del proceso de cierre del estímulo auditivo. Como puede observarse en la figura VIII.7.3(c), el proceso de cierre bimodal inicia más tarde que el proceso de cierre visual pero más temprano que el proceso de cierre del estímulo auditivo. Sin embargo, el proceso de cierre bimodal termina antes que cualquier de los procesos cognoscitivos unimodales, sugiriendo que la ejecución de la tarea es más rápida en la presentación bimodal que en la presentación unimodal. Los resultados del modelo no-lineal, figura VIII.7.6(a)-(e), indican que el modelo de suma de energías casi explica la actividad bimodal, al menos la actividad registrada en el electrodo Cz. El comportamiento casi constante del

TABLA VIII.7.1
Coefficientes del Modelo No-Lineal.

Ventana # 1		Ventana # 2		Ventana # 3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.961	$u_A(n-1)$	+0.846	$u_A(n-11)$	+0.053	$u_A(n-1)u_A(n-10)$
+0.387	$u_V(n-8)$	-0.759	$u_V(n-1)$	-0.123	$u_A(n-6)u_A(n-7)$
+0.272	$u_A(n-1)u_A(n-6)$	+0.270	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	+0.023	$u_A(n-12)u_V(n-1)$
+0.146	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	-0.092	$u_A(n-4)u_A(n-5)$	-0.566	$u_V(n-1)u_V(n-9)$
-0.340	$u_A(n-2)u_A(n-6)$	-0.391	$u_A(n-7)u_V(n-1)$	+0.559	$u_V(n-1)u_V(n-12)$
+0.368	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	+0.485	$u_A(n-8)u_V(n-2)$	+0.180	$u_V(n-3)u_V(n-6)$
-0.317	$u_A(n-7)u_A(n-8)$	-0.194	$u_A(n-11)u_V(n-5)$		
-0.154	$u_A(n-8)u_V(n-1)$	+0.074	$u_V(n-7)u_V(n-11)$		
-0.003	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	+0.051	$u_V(n-10)u_V(n-11)$		

fenómeno intersensorial puede ser explicado posiblemente por el hecho de que la actividad eléctrica auditiva comienza a ser significativa hasta los 430 milisegundos. Es posible que la no-linealidad del fenómeno intersensorial, siendo significativa a partir de los 440 milisegundos, sugiere que el proceso de cierre bimodal es generada con la siguiente secuencia temporal: el proceso de cierre bimodal se

inicia con la confirmación que el estímulo visual correcto ha ocurrido, seguido por la interacción del proceso cognoscitivo visual y el inicio del proceso cognoscitivo auditivo. Es importante notar que alrededor de los 440 milisegundos la onda cognoscitiva tiene energía suficiente para interactuar con el proceso cognoscitivo visual resultando en un fenómeno intersensorial. Parece ser que en la presentación bimodal no es necesario esperar el final del proceso auditivo cognoscitivo para generar el proceso de cierre bimodal. De hecho, para el presente experimento, es posible que el proceso visual

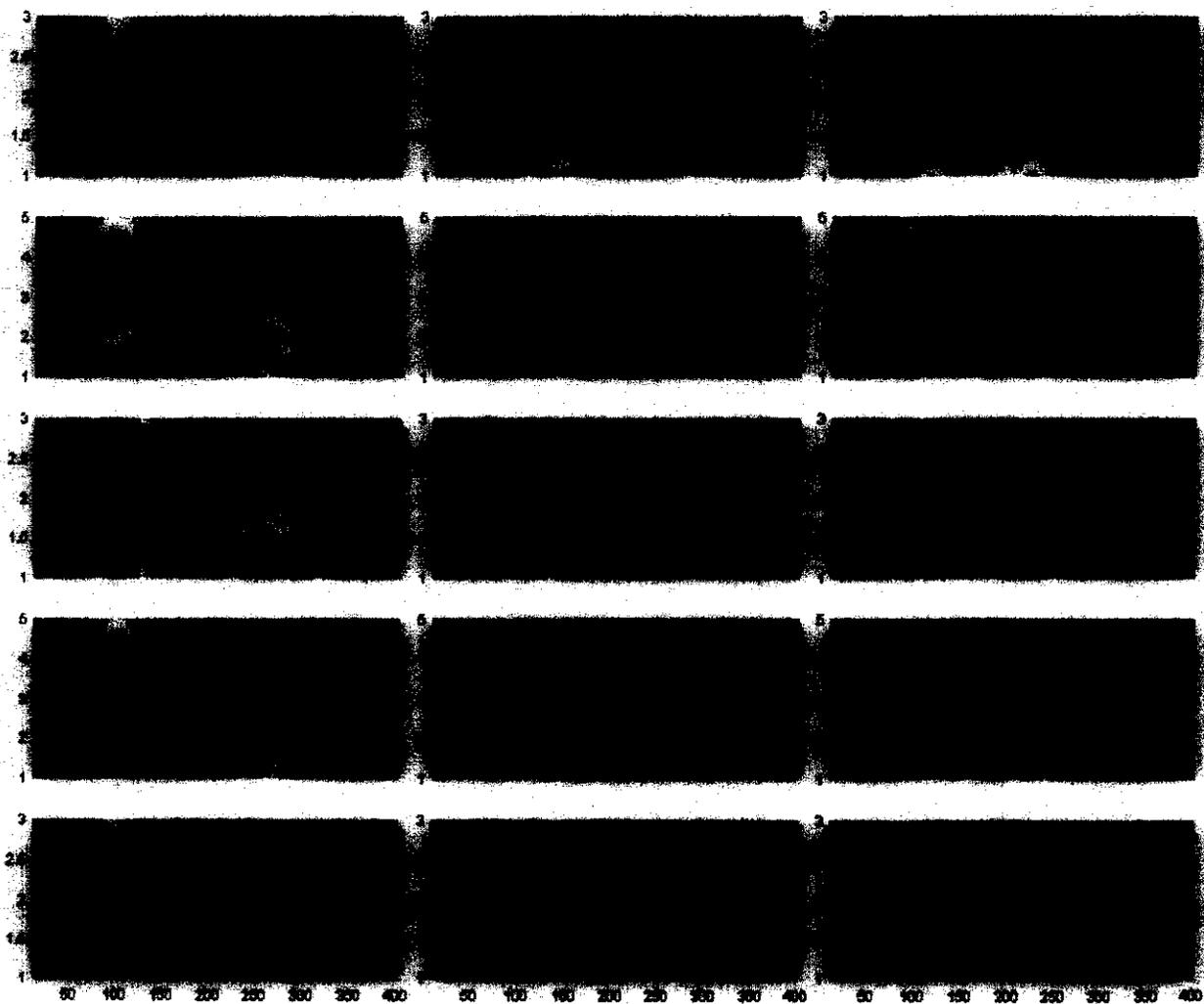


Figura VIII.7.7. Representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal. La parte inferior corresponde a los electrodos F8, T4 y T6 del sistema 10-20.

realice el papel de un proceso de preparación mientras que la información auditiva interactúa con la información visual resultando en un proceso de cierre bimodal más rápido. Los coeficientes del modelo son reportados en la tabla VIII.7.1.

VIII.7.2. Análisis Espacial de los Potenciales Evocados

La representación vertical de las actividades eléctricas unimodales y bimodal se proporciona en la figura VIII.7.7. El componente N100 auditivo parece estar lateralizado a la izquierda mientras que el componente P200 presenta simetría. La actividad de cierre auditiva es más intensa en la región parietal y presenta simetría. El componente N100 visual muestra una amplia dispersión de la energía

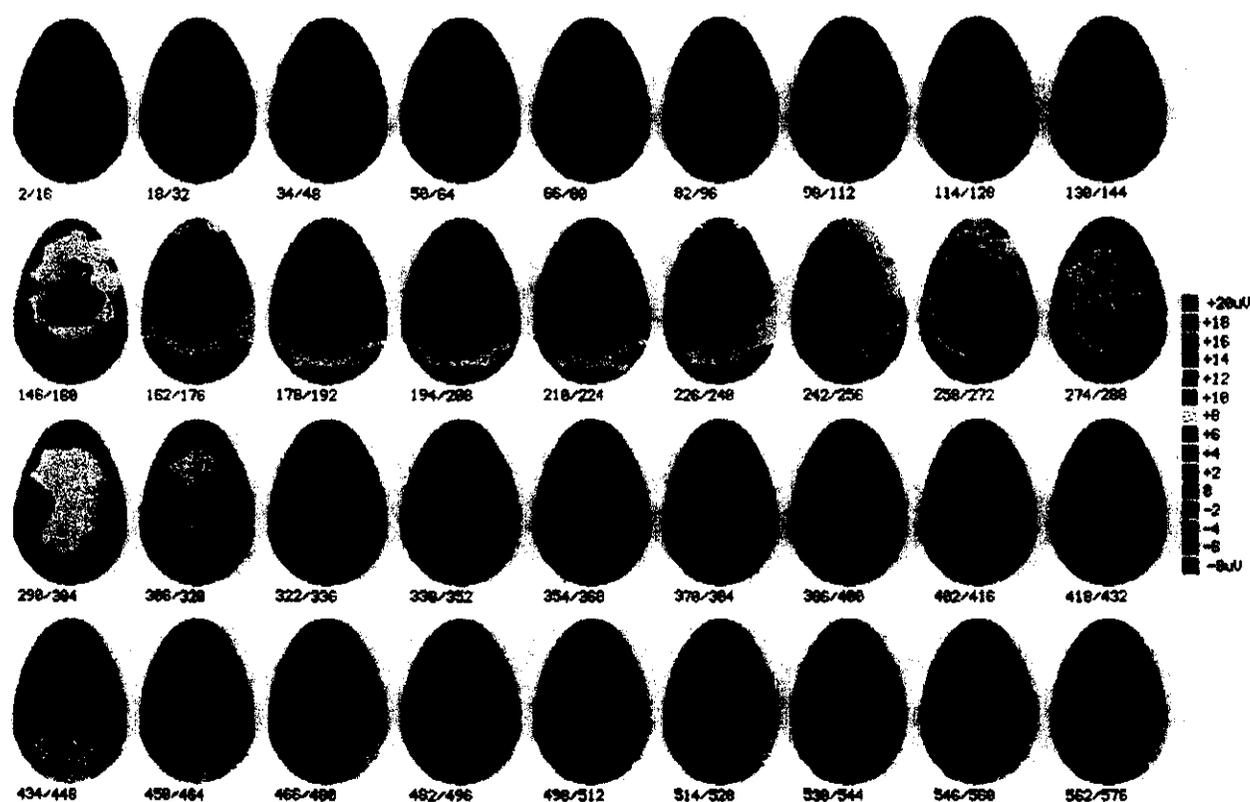


Figura VIII.7.8. Distribución espacial del potencial evocado auditivo, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

mientras que la actividad del componente P200 esta localizada en la región vertex-parietal. La representación vertical indica una ligera lateralización derecha del proceso de post-categorización visual y una lateralización izquierda del componente P300. El componente bimodal N100 parece tener una lateralización izquierda mientras que el componente P200 muestra una distribución simétrica. La actividad eléctrica bimodal entre los 225 y 370 milisegundos presenta una ligera lateralización derecha mientras que el componente P300 muestra su actividad en la región parietal con una ligera lateralización izquierda. Los mapas topográficos de los potenciales unimodales y bimodal adquiridos se muestran en las figuras VIII.7.8-10. En el caso auditivo, figura VIII.7.8, un componente negativo aparece en el vertex alrededor de los 100 milisegundos con una lateralización izquierda. En la

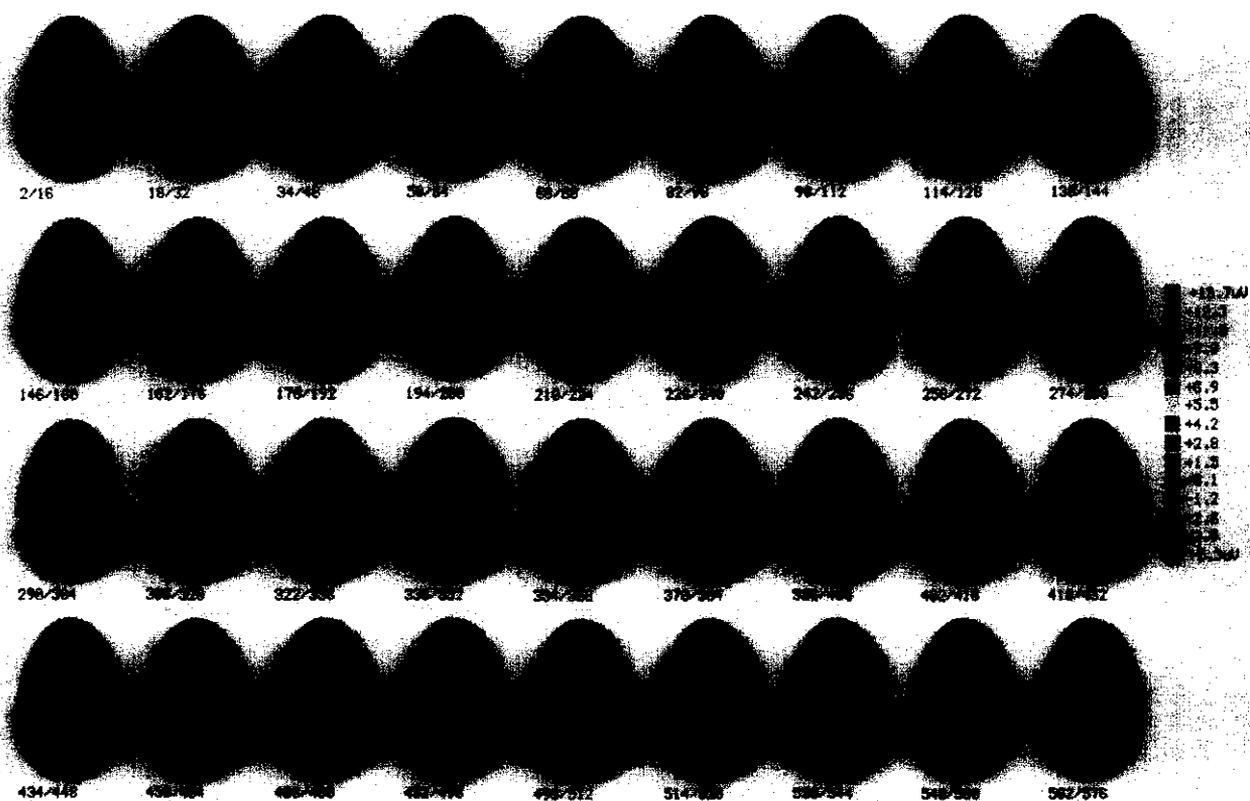


Figura VIII.7.9. Distribución espacial del potencial evocado visual, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

actividad visual existen dos ondas negativas, una onda N139 con una distribución fronto-central y una onda N153 con una distribución occipital. Para el caso bimodal, el componente N100 aparece con una distribución central amplia que no esta presente en la información auditiva o visual, sugiriendo que en el potencial bimodal se combinan ambas informaciones. El fenómeno de "switch" parece seguir la distribución espacial encontrada en los experimentos anteriores, es decir una negatividad fronto-central seguida por una negatividad occipital, figura VIII.7.11. El componente auditivo P200 muestra una distribución amplia siendo más intensa en la región del vertex con una ligera lateralización derecha. En contraste, el componente bimodal P200 tiene una distribución similar a la distribución del componente P200 auditivo pero se genera antes y su actividad presenta menor dispersión. La

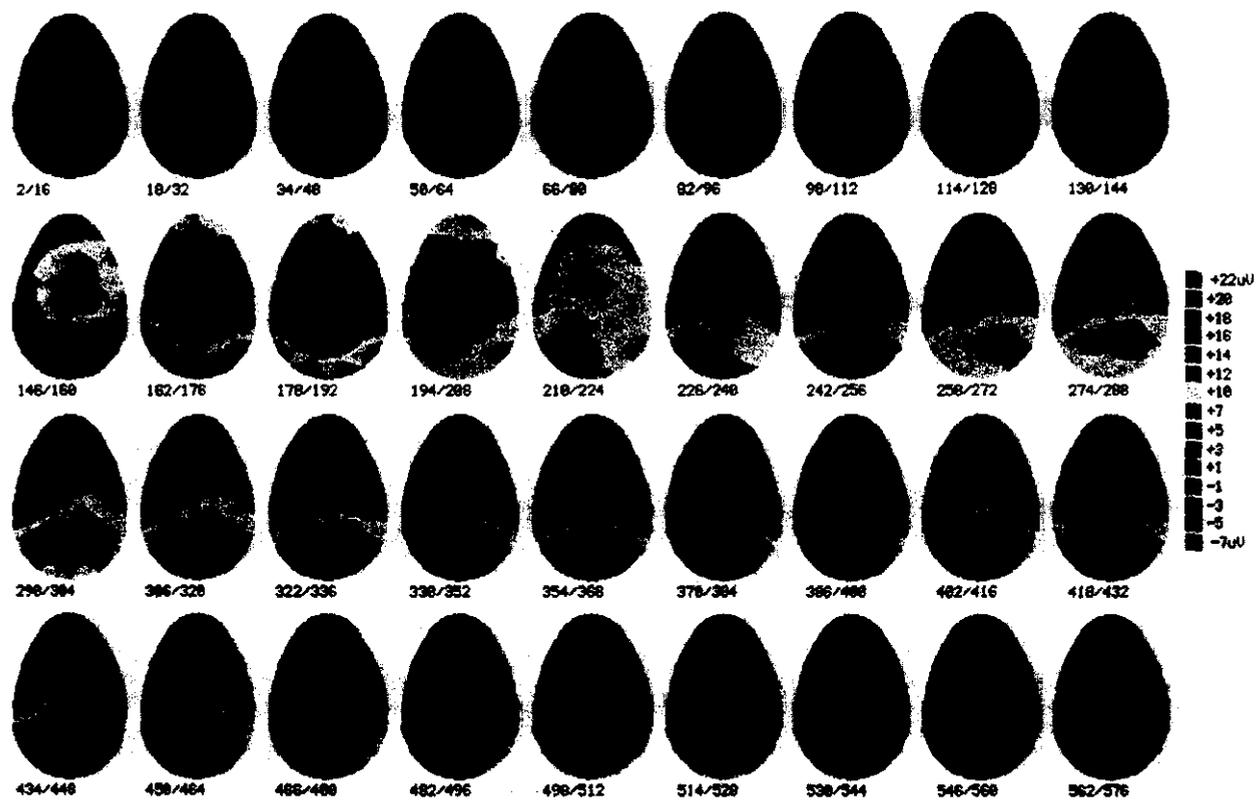


Figura VIII.7.10. Distribución espacial del potencial evocado bimodal, los mapas topográficos se presentan cada 15 milisegundos.

actividad eléctrica bimodal asociada con la interacción entre el proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, de los 225 a los 370 milisegundos, parece seguir más de cerca a la actividad visual pero modificada por la interacción con la actividad auditiva, figura VIII.7.10. Los componentes bimodales relacionados con el proceso de cierre indican que una actividad positiva se origina en la región parietal con una distribución parecida a la relacionada con el proceso de cierre del estímulo visual y auditivo. Sin embargo, los mapas topográficos indican que la actividad bimodal inicia más temprano que la actividad auditiva y termina antes que cualquier de los procesos unimodales.

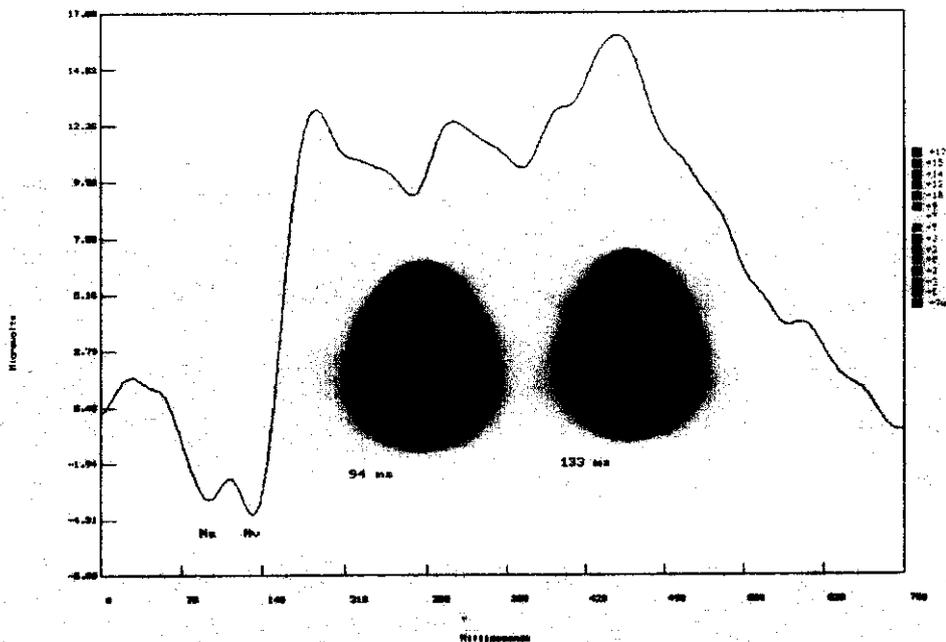


Figura VIII.7.11. Distribución espacial del componente bimodal N100.

VIII.7.3. Distribución Espacial de los Resultados del Modelo No-Lineal

Las actividades eléctricas unimodales y bimodal para la primera ventana de análisis se muestra en las figuras VIII.7.12(a)-15(a). Es evidente que la pendiente de bajada del componente bimodal

P200 se comporta diferente en las regiones frontal y parietal. En la región frontal, el componente bimodal decae más rápido que en la región parietal, figuras VIII.7.13(a) y VIII.7.15(a). Los

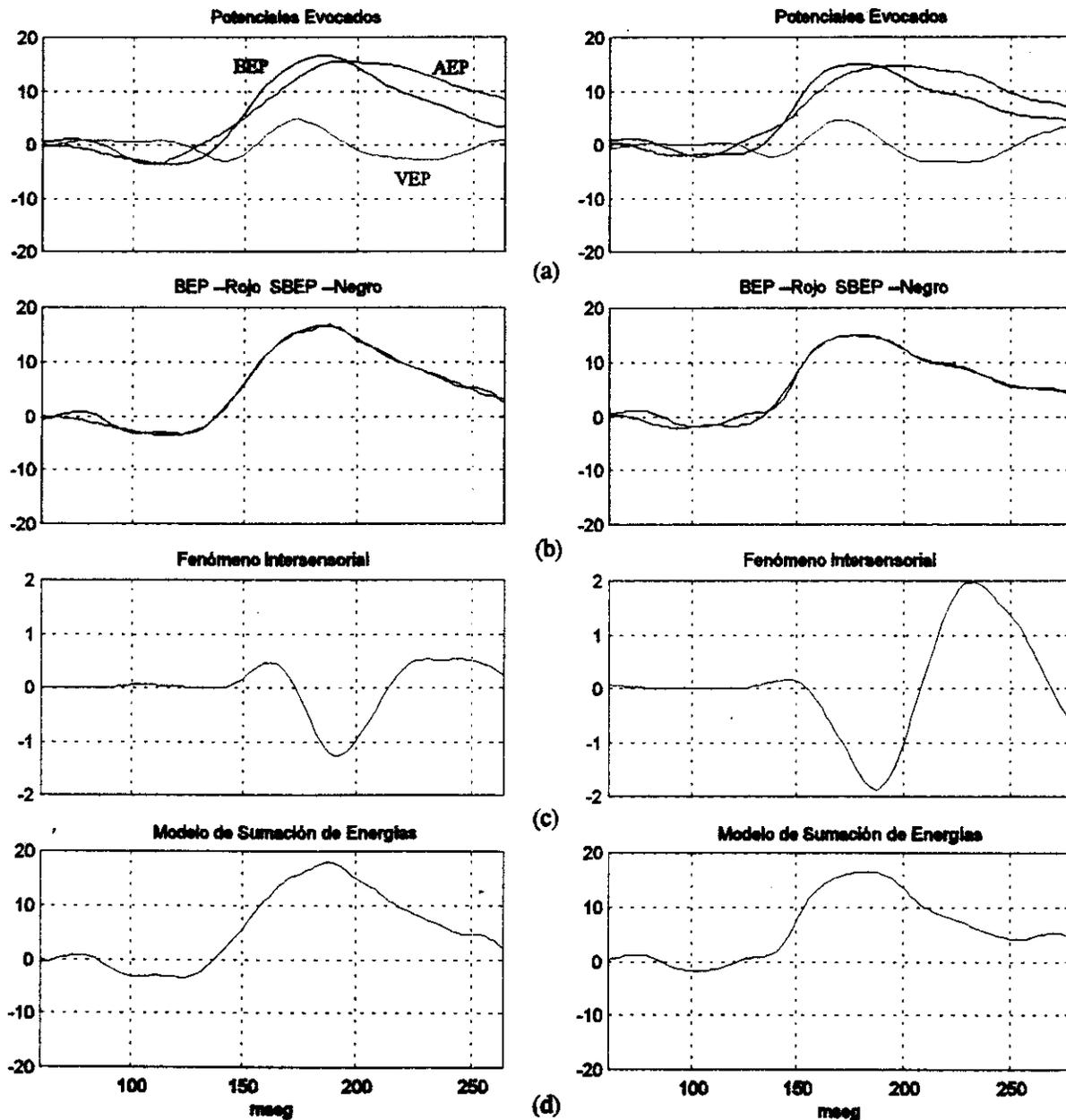


Figura VIII.7.12. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos F3 y F4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

resultados del modelo no-lineal indican que la actividad correspondiente al modelo de suma de energías parece estar más relacionado con el potencial bimodal, sin embargo, la contribución del

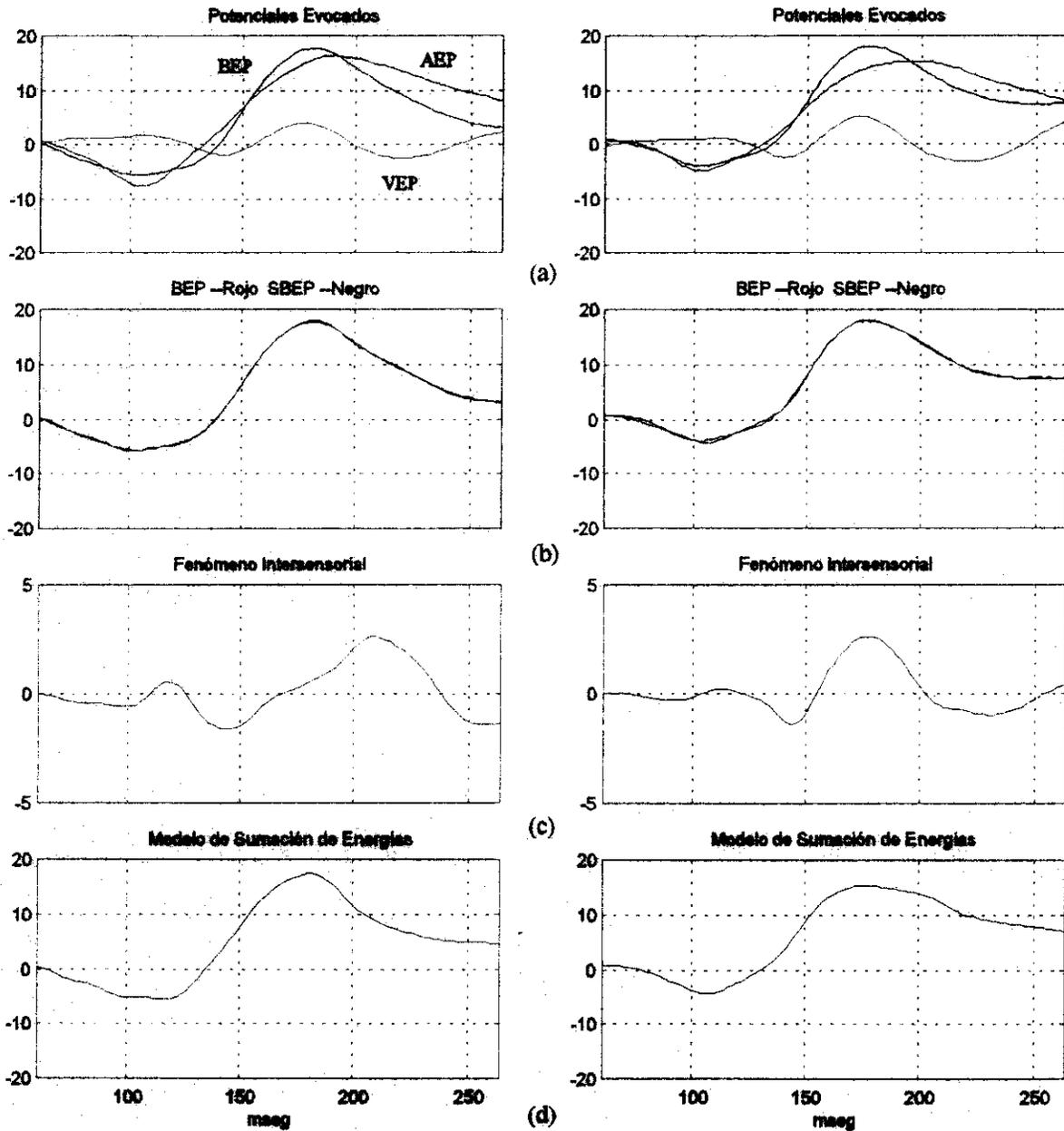


Figura VIII.7.13. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos C3 y C4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y simulado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intersensorial.

fenómeno intersensorial es necesaria en la mayoría de los electrodos para describir completamente la información bimodal. El fenómeno intersensorial parece iniciar antes en la región central y en la región parietal mientras que se presenta más tarde en la región frontal. De acuerdo a los resultados,

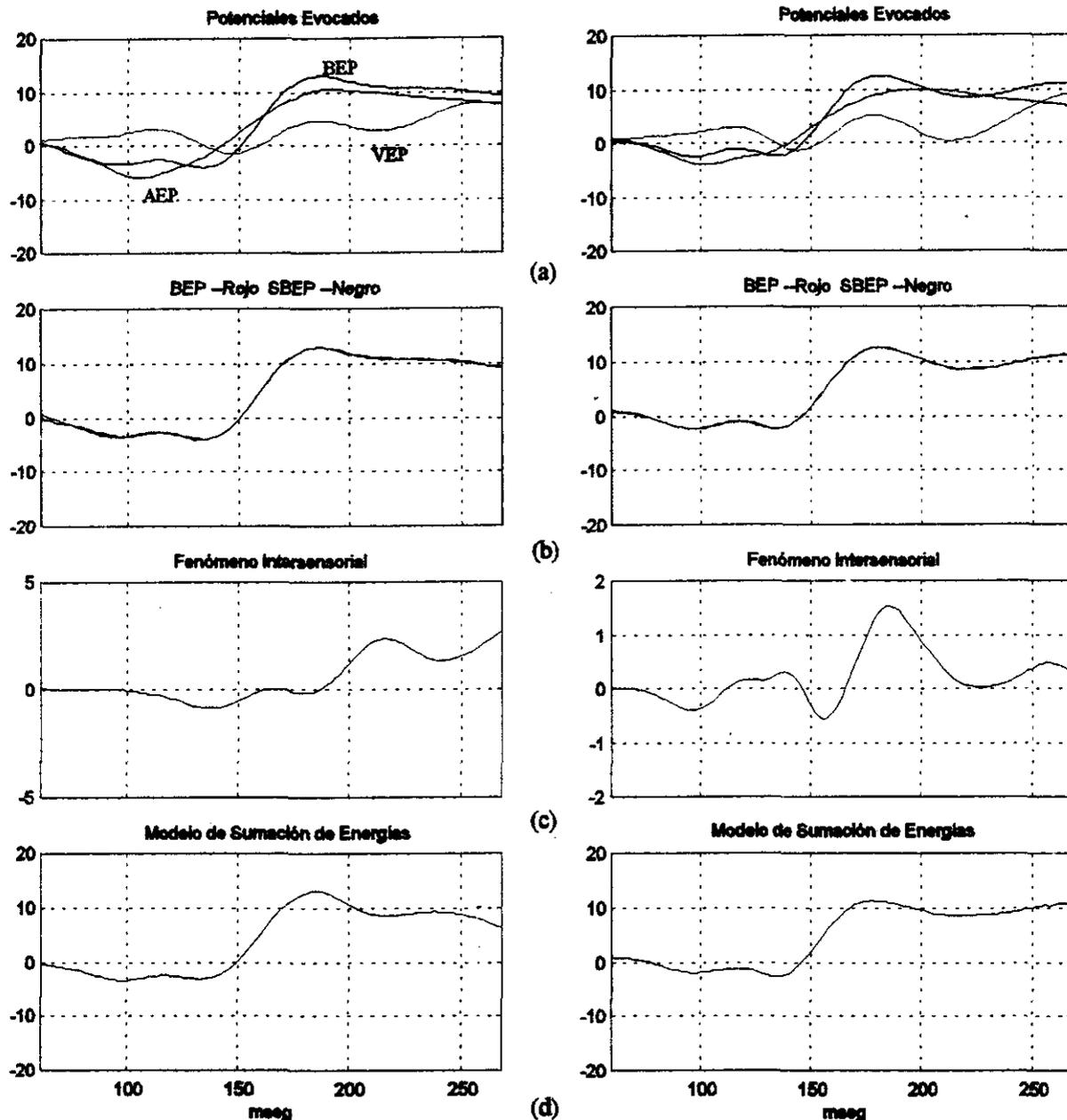


Figura VIII.7.14. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos P3 y P4, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intrasensorial.

el componente bimodal N100, en las regiones frontales, puede explicarse principalmente por el modelo de suma de energías. El fenómeno intersensorial para el componente bimodal N100 es más intenso en la región central y está ligeramente lateralizado hacia la izquierda, situación que coincide

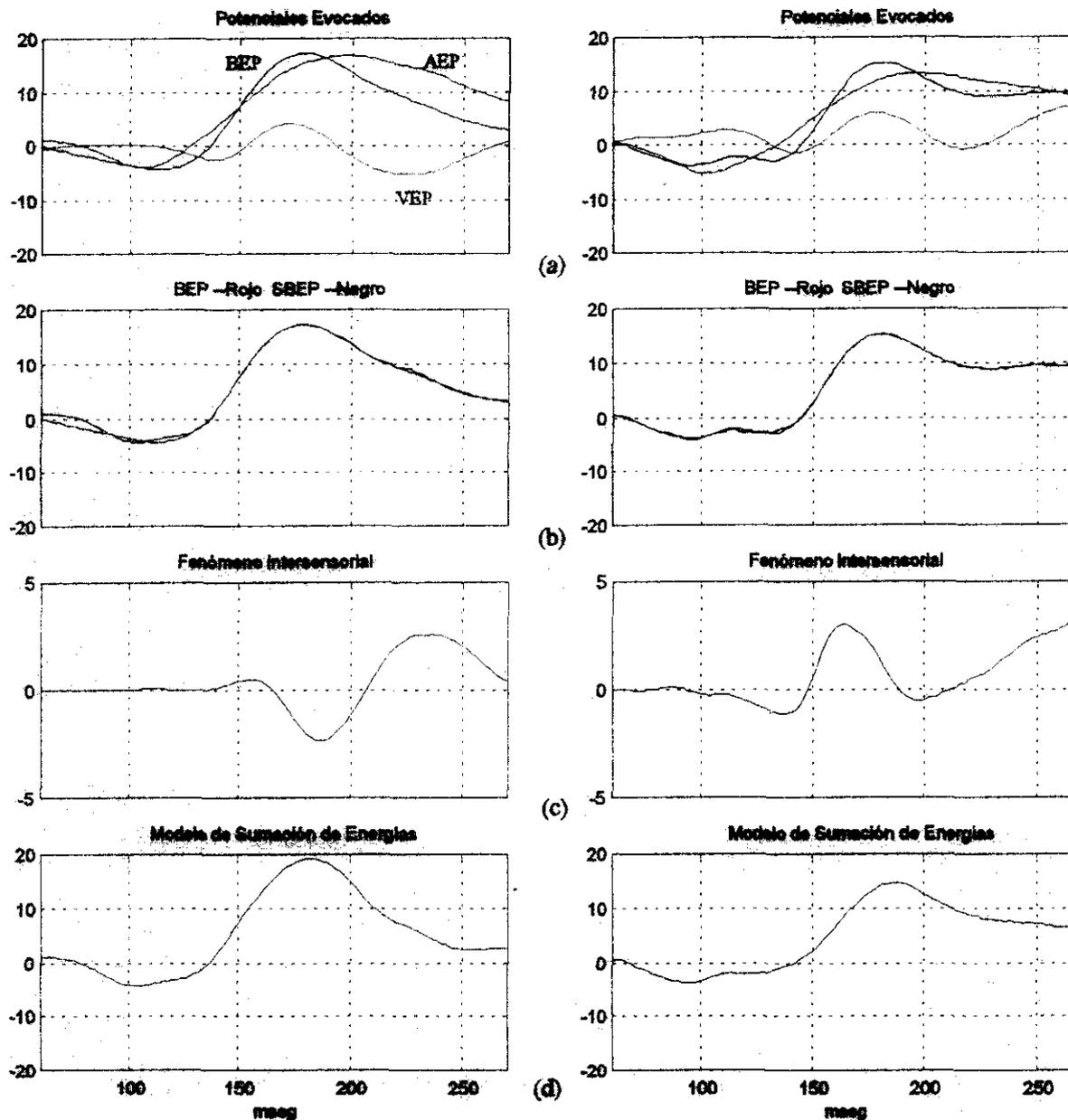


Figura VIII.7.15. Modelo no-lineal. (a) Potencial evocado auditivo (AEP), potencial evocado visual (VEP) y potencial evocado bimodal (BEP) con estimulación simultánea en los electrodos Pz y Cz, (b) potencial evocado bimodal adquirido y sintetizado, (c) información obtenida por la interacción de las vías auditiva y visual y (d) suma de la contribución lineal y el fenómeno intersensorial.

con la lateralización de la actividad bimodal y con el comportamiento del componente auditivo N100. Para el componente bimodal P200 la actividad intersensorial esta localizada principalmente en las regiones del vertex y parietal, con una ligera lateralización izquierda. Los coeficientes del modelo, para esta primera ventana de análisis, se muestran en la tabla VIII.7.2.

TABLE VIII.7.2
Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Primera Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.183	$u_A(n-1)$	+1.071	$u_A(n-1)$	+0.985	$u_A(n-1)$	+1.061	$u_A(n-1)$
+0.590	$u_A(n-7)$	+0.378	$u_A(n-1)u_A(n-12)$	+0.418	$u_V(n-1)$	-0.277	$u_A(n-8)$
-0.563	$u_A(n-13)$	-0.110	$u_A(n-3)u_A(n-4)$	+0.053	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.086	$u_A(n-1)u_A(n-8)$
-0.970	$u_V(n-9)$	+0.398	$u_A(n-4)u_A(n-10)$	-0.019	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	+0.159	$u_A(n-1)u_V(n-3)$
-0.107	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.655	$u_A(n-4)u_A(n-12)$	-0.053	$u_A(n-11)u_A(n-12)$	+0.078	$u_A(n-4)u_A(n-8)$
+1.065	$u_A(n-1)u_A(n-8)$	-0.060	$u_A(n-8)u_V(n-7)$	-0.027	$u_A(n-12)u_V(n-12)$	-0.164	$u_A(n-7)u_A(n-8)$
-0.338	$u_A(n-1)u_A(n-11)$	+0.046	$u_A(n-10)u_A(n-11)$	-0.246	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	-0.204	$u_A(n-8)u_V(n-2)$
-0.018	$u_A(n-1)u_V(n-10)$	-0.078	$u_A(n-11)u_A(n-12)$	-0.063	$u_V(n-11)u_V(n-12)$	+0.021	$u_A(n-8)u_V(n-8)$
+0.127	$u_A(n-2)u_A(n-13)$	+0.026	$u_A(n-12)u_V(n-6)$				
-0.622	$u_A(n-4)u_A(n-6)$	-0.037	$u_V(n-1)u_V(n-2)$				
-0.088	$u_A(n-12)u_A(n-13)$						
+0.126	$u_V(n-1)u_V(n-2)$						
+0.268	$u_V(n-10)u_V(n-11)$						

C4		P3		Pz		P4	
+0.925	$u_A(n-1)$	+1.263	$u_A(n-1)$	+1.015	$u_A(n-1)$	+0.939	$u_A(n-1)$
-0.026	$u_A(n-10)$	-0.577	$u_A(n-3)$	-0.415	$u_A(n-8)$	+0.945	$u_V(n-1)$
+0.118	$u_V(n-1)$	+0.185	$u_V(n-1)$	-0.068	$u_V(n-2)$	-0.832	$u_V(n-3)$
+0.215	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.813	$u_V(n-15)$	-0.176	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.319	$u_V(n-9)$
+0.927	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	+0.048	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.065	$u_A(n-1)u_V(n-2)$	+0.778	$u_A(n-1)u_A(n-10)$
-0.217	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.050	$u_A(n-15)u_V(n-15)$	+1.312	$u_A(n-2)u_A(n-8)$	+0.119	$u_A(n-1)u_V(n-7)$
-0.949	$u_A(n-2)u_V(n-2)$	+0.067	$u_V(n-1)u_V(n-15)$	+0.095	$u_A(n-2)u_V(n-2)$	-0.751	$u_A(n-2)u_A(n-10)$
+0.003	$u_A(n-3)u_A(n-4)$	-0.018	$u_V(n-6)u_V(n-7)$	-0.981	$u_A(n-3)u_A(n-8)$	-0.187	$u_A(n-3)u_A(n-13)$
-0.075	$u_A(n-10)u_V(n-1)$			-0.328	$u_A(n-4)u_V(n-7)$	+0.105	$u_A(n-5)u_A(n-7)$
+0.130	$u_A(n-10)u_V(n-2)$			-0.135	$u_A(n-9)u_A(n-10)$	-0.101	$u_A(n-7)u_V(n-7)$
				+0.269	$u_A(n-9)u_V(n-8)$	+0.055	$u_A(n-12)u_A(n-13)$
				-0.058	$u_A(n-10)u_V(n-3)$	+0.032	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
				+0.029	$u_V(n-1)u_V(n-10)$	+0.831	$u_V(n-7)u_V(n-13)$
						-0.804	$u_V(n-9)u_V(n-11)$

En la figura VIII.7.16 se muestran las actividades unimodales y bimodal consideradas en la segunda ventana de análisis. Es importante notar que en esta ventana se incluye el proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, representado por el componente P300a. La actividad bimodal parece seguir más de cerca a la actividad visual y su amplitud es mayor que cualquiera de las amplitudes unimodales, tanto en la región central como en la región parietal. En las figuras VIII .7.17-19 se muestran los resultados del

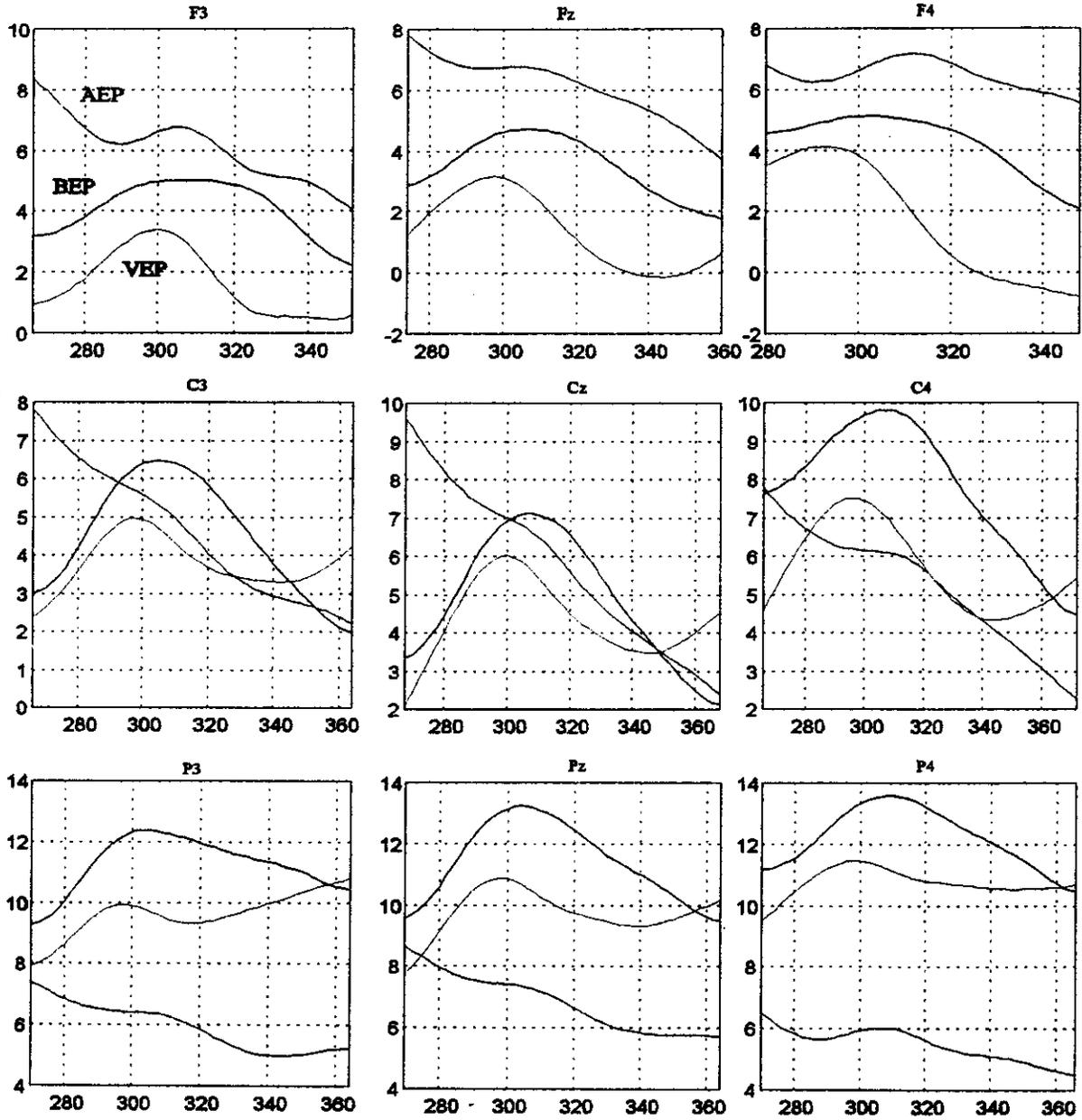


Figura VIII.7.16. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización.

modelo no-lineal. De los resultados, es evidente que tanto la contribución lineal como la no-lineal son importantes en esta segunda ventana de análisis. Parece ser que el proceso de categorización auditiva es acelerado por el componente visual P300a mediante una interacción del tipo no-lineal. El modelo

indica un incremento en la contribución intersensorial en las regiones central y parietal. Los coeficientes del modelo se incluyen en la tabla VIII.7.3.

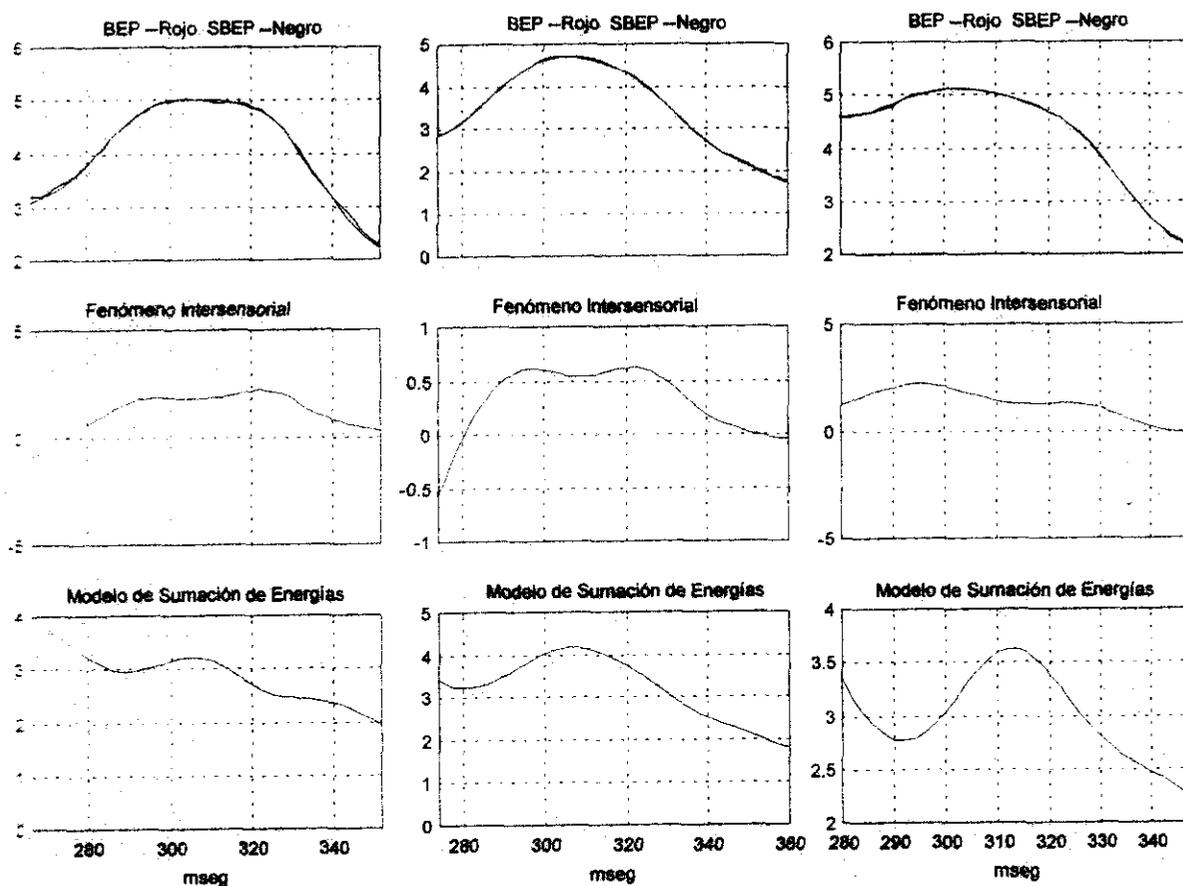


Figura VIII.7.17. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo F3, en la columna central en el electrodo Fz y en la columna de la derecha en el electrodo F4.

TABLE VIII.7.3
Coeficientes del Modelo No Lineal para la Segunda Ventana de Análisis.

F3		Fz		F4		C3	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
+0.476	$u_A(n-1)$	+0.566	$u_A(n-1)$	+0.071	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.381	$u_A(n-16)$
+0.290	$u_A(n-1)u_A(n-17)$	-0.022	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	-0.104	$u_A(n-2)u_A(n-5)$	-0.335	$u_V(n-1)$

-0.540	$u_A(n-4)u_V(n-12)$	-0.115	$u_A(n-1)u_V(n-9)$	+0.177	$u_A(n-5)u_V(n-6)$	-0.630	$u_A(n-1)u_V(n-15)$
+0.608	$u_A(n-9)u_V(n-12)$	+0.139	$u_A(n-12)u_V(n-9)$	-0.463	$u_A(n-7)u_V(n-10)$	+1.062	$u_A(n-1)u_V(n-16)$
+0.101	$u_A(n-12)u_V(n-5)$	+0.092	$u_V(n-1)u_V(n-4)$	-0.067	$u_A(n-10)u_V(n-7)$	-0.430	$u_A(n-3)u_V(n-11)$
-0.331	$u_A(n-12)u_V(n-11)$	+0.089	$u_V(n-11)u_V(n-12)$	+0.526	$u_A(n-10)u_V(n-10)$	-0.476	$u_A(n-5)u_V(n-13)$
						+0.301	$u_A(n-6)u_V(n-10)$
						+0.698	$u_A(n-7)u_V(n-9)$
						-0.230	$u_A(n-16)u_V(n-9)$

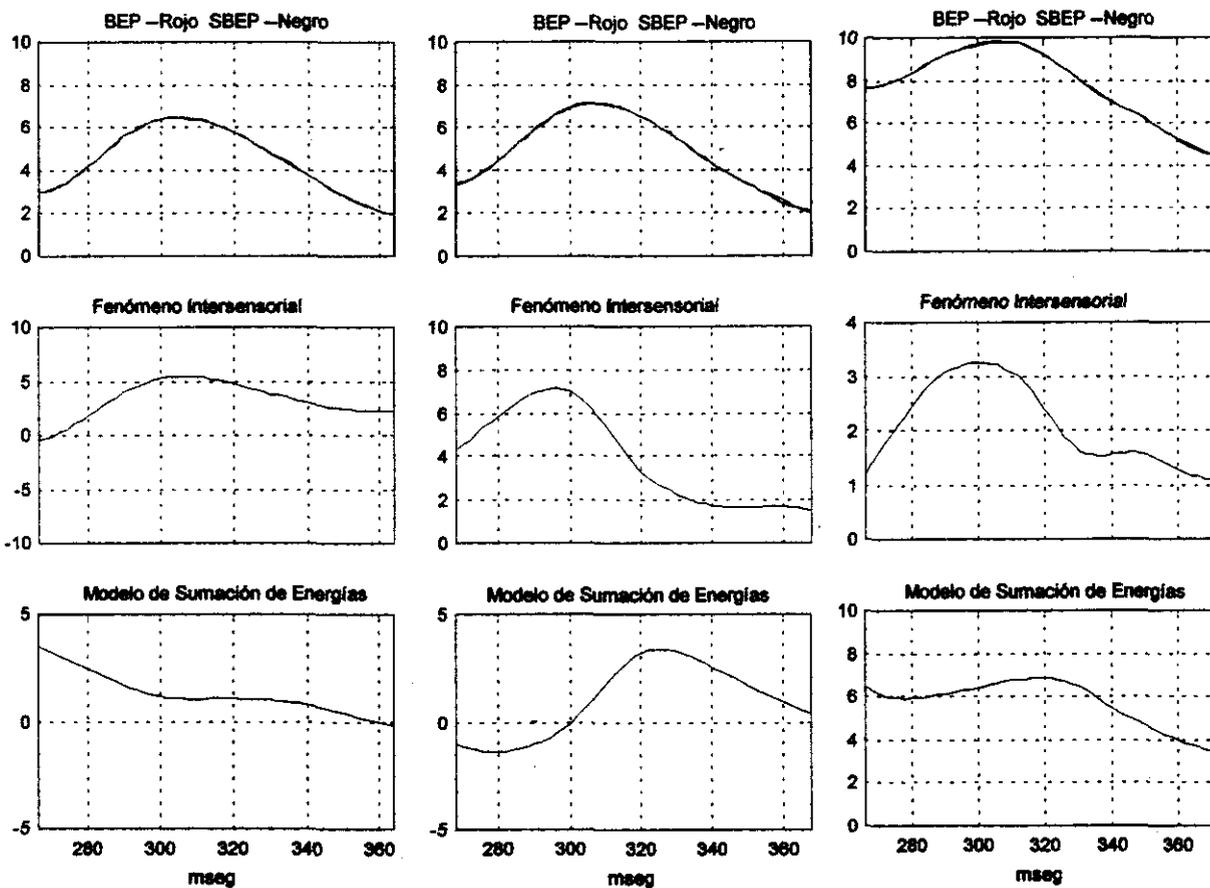


Figura VIII.7.18. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

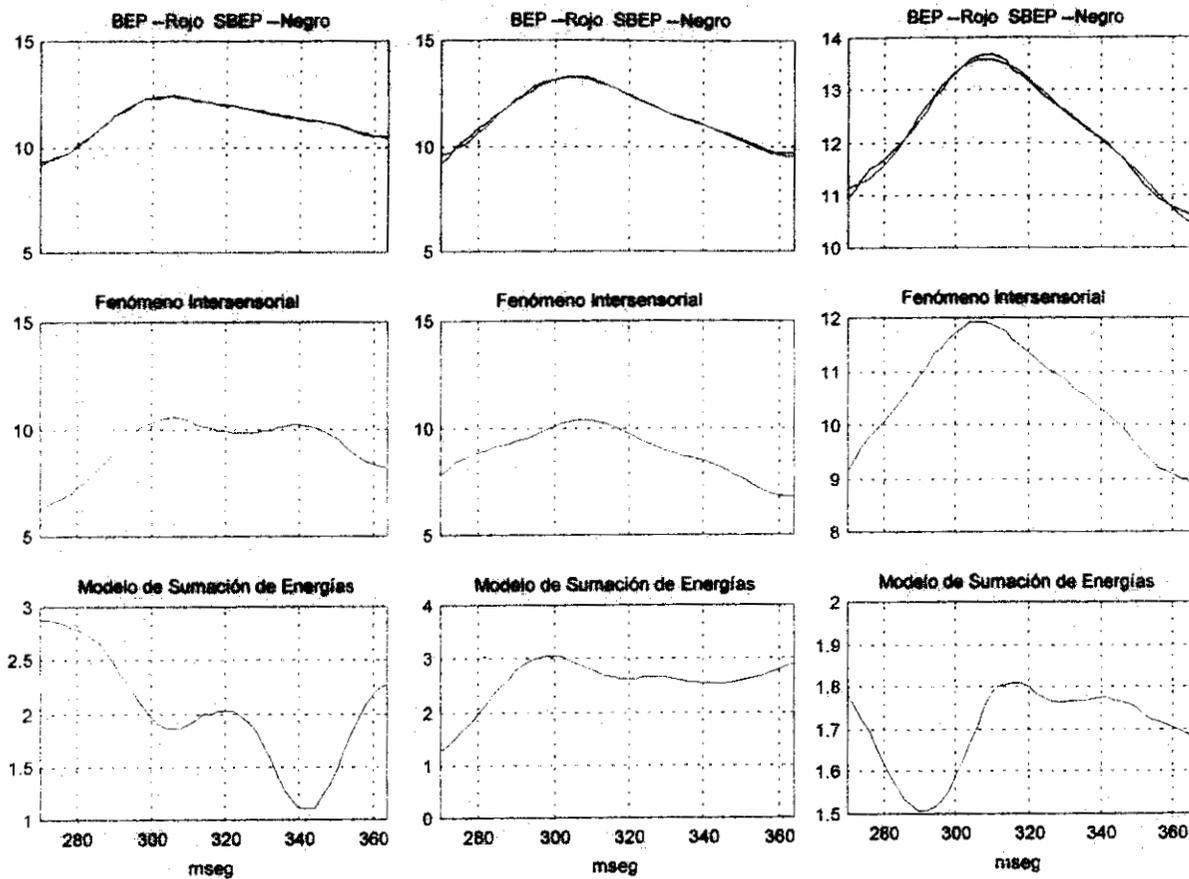


Figura VIII.7.19. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

C4		P3		Pz		P4	
+0.751	$u_A(n-8)$	-0.402	$u_A(n-1)u_V(n-20)$	-0.709	$u_A(n-3)$	+0.065	$u_A(n-1)$
+0.003	$u_V(n-10)$	+0.513	$u_A(n-4)u_V(n-22)$	+0.575	$u_V(n-2)$	+0.451	$u_V(n-4)$
+0.113	$u_A(n-2)u_V(n-15)$	-0.083	$u_A(n-6)u_V(n-1)$	+0.036	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	+0.222	$u_A(n-1)u_V(n-7)$
-0.099	$u_A(n-8)u_V(n-14)$	-0.056	$u_A(n-18)u_V(n-6)$	+0.204	$u_A(n-18)u_V(n-10)$	-0.226	$u_A(n-4)u_V(n-8)$
-0.400	$u_V(n-13)u_V(n-7)$	+0.199	$u_V(n-20)u_V(n-7)$	-0.083	$u_A(n-21)u_V(n-11)$	+0.127	$u_A(n-6)u_V(n-9)$
+0.443	$u_V(n-15)u_V(n-7)$	+0.080	$u_V(n-1)u_V(n-18)$			+0.014	$u_V(n-11)u_V(n-11)$
-0.126	$u_V(n-1)u_V(n-15)$	+0.036	$u_V(n-5)u_V(n-11)$			+0.042	$u_V(n-15)u_V(n-12)$
+0.218	$u_V(n-3)u_V(n-15)$	-0.125	$u_V(n-8)u_V(n-23)$			-0.030	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
-0.046	$u_V(n-7)u_V(n-10)$						

La tercera ventana de análisis incluye el componente visual y bimodal P300 y el inicio del proceso de cierre auditivo, figura VIII.7.20. Como puede observarse de la figura, el componente

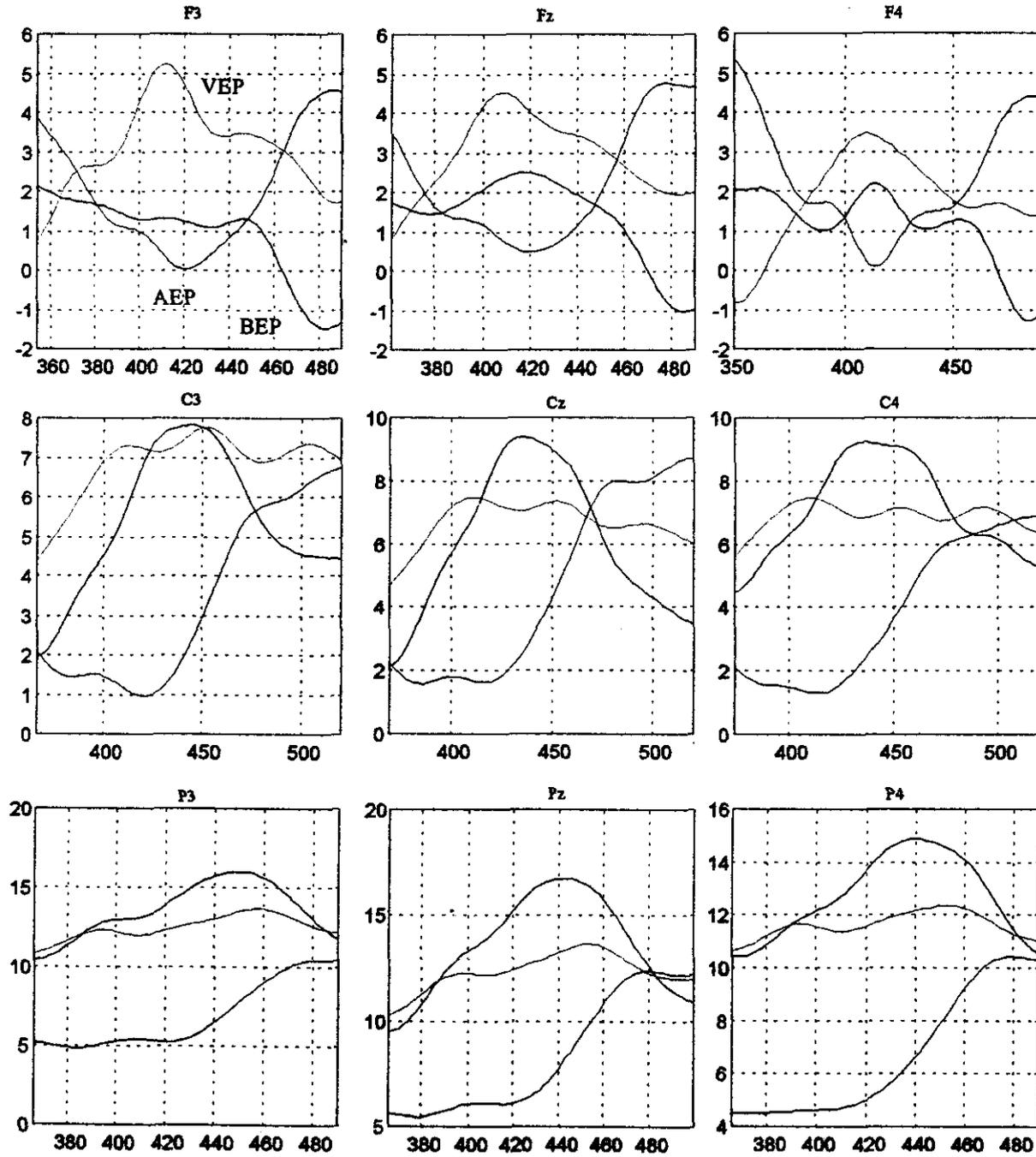


Figura VIII.7.20. Potencial evocado auditivo (AEP), el potencial evocado visual (VEP) y el potencial evocado bimodal (BEP) utilizando estimulación simultánea. La actividad auditiva corresponde al proceso de categorización mientras que la actividad visual corresponde a el proces. de post-categorización.

El modelo P300 tiene lugar en la región centro-parietal y en consecuencia, el modelo no-lineal es aplicado a estas áreas. El modelado no-lineal indica que el fenómeno de interacción es mayor en la región parietal, reforzando lo encontrado para el electrodo Cz y sugiriendo que en la presentación del modelo no es necesario esperar a que el proceso auditivo cognoscitivo termine para generar el proceso de cierre bimodal. Los coeficientes del modelo no-lineal se reportan en la tabla VIII.7.4.

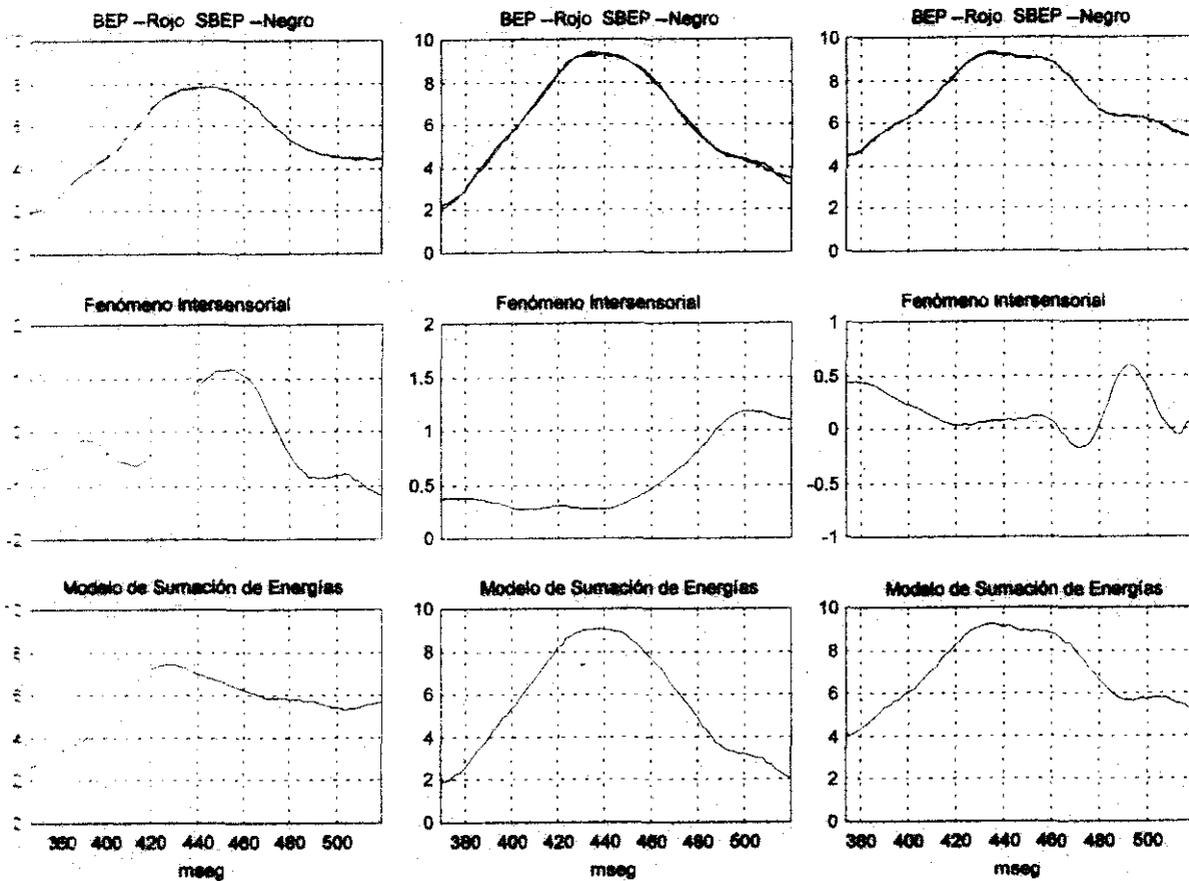


Figura VIII.7.21: En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo C3, en la columna central en el electrodo Cz y en la columna de la derecha en el electrodo C4.

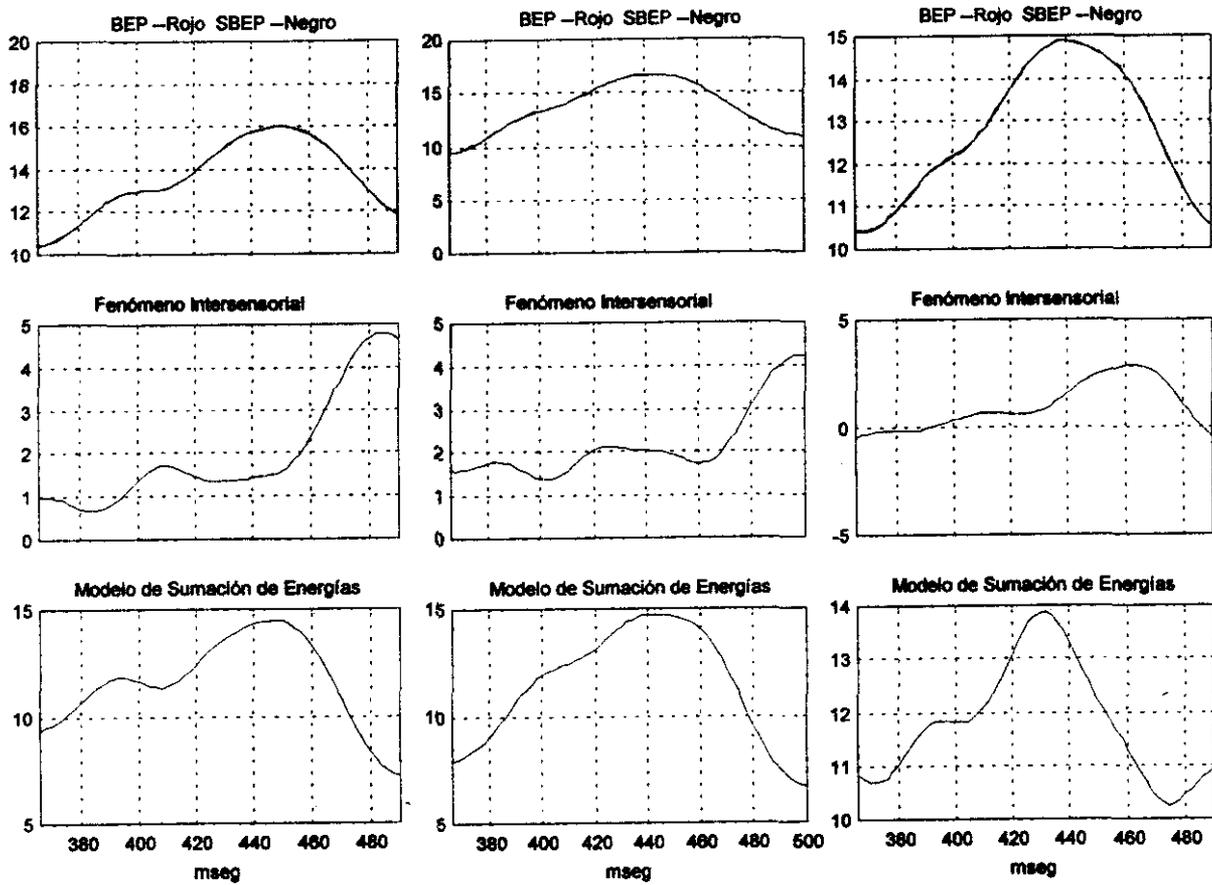


Figura VIII.7.22. En la columna izquierda se muestra el análisis en el electrodo P3, en la columna central en el electrodo Pz y en la columna de la derecha en el electrodo P4.

TABLE VIII.7.4
Coefficientes del Modelo No-Lineal para la Tercera Ventana de Análisis.

C3		Cz		C4	
Coef.	Elemento	Coef.	Elemento	Coef.	Elemento
-0.440	$u_A(n-11)$	+0.053	$u_A(n-1)u_A(n-10)$	+0.567	$u_A(n-13)$
+0.842	$u_A(n-12)$	-0.123	$u_A(n-6)u_A(n-7)$	+0.879	$u_V(n-15)$
-0.436	$u_A(n-1)u_A(n-2)$	+0.023	$u_A(n-12)u_V(n-1)$	+0.206	$u_A(n-1)u_A(n-14)$
+0.423	$u_A(n-1)u_V(n-1)$	-0.566	$u_V(n-1)u_V(n-9)$	-0.358	$u_A(n-9)u_A(n-11)$

+0.350	$u_A(n-2)u_A(n-3)$	+0.559	$u_V(n-1)u_V(n-12)$	+0.143	$u_A(n-13)u_V(n-4)$
-0.007	$u_A(n-2)u_V(n-10)$	+0.180	$u_V(n-3)u_V(n-6)$	-0.284	$u_A(n-13)u_V(n-10)$
-0.445	$u_A(n-3)u_V(n-2)$			+0.151	$u_A(n-14)u_V(n-15)$
+0.190	$u_A(n-8)u_V(n-9)$			-0.600	$u_V(n-1)u_V(n-14)$
-0.197	$u_A(n-9)u_V(n-12)$			+0.638	$u_V(n-2)u_V(n-15)$
-0.094	$u_A(n-10)u_V(n-4)$				
+0.102	$u_A(n-10)u_V(n-11)$				
-0.121	$u_V(n-1)u_V(n-8)$				
+0.105	$u_V(n-3)u_V(n-5)$				
+0.094	$u_V(n-3)u_V(n-12)$				
+0.058	$u_V(n-11)u_V(n-12)$				

P3		Pz		P4	
+0.732	$u_A(n-2)$	-0.167	$u_A(n-3)$	-1.827	$u_A(n-20)$
+0.001	$u_A(n-2)u_A(n-22)$	-0.079	$u_A(n-7)u_V(n-4)$	-0.260	$u_A(n-1)u_A(n-14)$
-0.104	$u_A(n-3)u_A(n-10)$	+0.074	$u_A(n-7)u_V(n-17)$	+0.189	$u_V(n-1)u_V(n-10)$
-0.027	$u_A(n-4)u_A(n-8)$	-0.059	$u_A(n-8)u_A(n-10)$	-0.024	$u_A(n-2)u_A(n-3)$
+0.050	$u_A(n-5)u_V(n-17)$	+0.026	$u_A(n-12)u_V(n-1)$	-0.108	$u_A(n-4)u_V(n-19)$
-0.385	$u_A(n-6)u_V(n-2)$	-0.077	$u_A(n-12)u_V(n-17)$	+0.392	$u_A(n-6)u_A(n-20)$
+0.190	$u_A(n-6)u_V(n-3)$	+0.067	$u_V(n-13)u_V(n-1)$	-0.081	$u_A(n-6)u_V(n-1)$
+0.171	$u_A(n-6)u_V(n-5)$	-0.102	$u_V(n-19)u_V(n-8)$	-0.044	$u_V(n-1)u_V(n-2)$
+0.216	$u_V(n-1)u_V(n-2)$	+0.118	$u_A(n-19)u_V(n-12)$	+0.194	$u_V(n-1)u_V(n-20)$
-0.207	$u_V(n-1)u_V(n-5)$	+0.047	$u_V(n-1)u_V(n-2)$		
+0.012	$u_V(n-1)u_V(n-22)$	-0.035	$u_V(n-1)u_V(n-16)$		
+0.064	$u_V(n-6)u_V(n-22)$	+0.101	$u_V(n-8)u_V(n-19)$		

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el capítulo VIII se muestran los resultados del modelo no-lineal aplicado a las actividades eléctricas adquiridas en los seis experimentos. En cada experimento, el potencial evocado bimodal adquirido difiere de la suma de los potenciales evocados unimodales indicando que se generan procesos más complejos. En los experimentos se establece la posible asociación de las diferentes etapas de procesamiento de información, indicadas por el comportamiento espacial de los diferentes componentes de los potenciales evocados, con las señales generadas por el modelo, y en particular, con el fenómeno intersensorial. Por ejemplo, el análisis no-lineal del tercer y cuarto experimento reflejan que el fenómeno intersensorial depende de la discriminabilidad de los estímulos. El análisis longitudinal presenta evidencia de relaciones intersensoriales mediante la evolución temporal de las señales definidas en el modelo no-lineal como “sumación de energías”, “fenómeno intrasensorial” y “fenómeno intersensorial”. Los resultados permiten establecer posibles mecanismos de interacción entre la información de la vía visual y la información de la vía auditiva. Es evidente que el análisis del fenómeno intersensorial a través de los experimentos muestra que el fenómeno es dependiente del grado de dificultad de la tarea asignada al sujeto y presenta diferentes distribuciones espaciales.

Es posible que los resultados obtenidos con el modelo no-lineal del potencial bimodal, en combinación con la redefinición del concepto del fenómeno intersensorial, ayuden a comprender y generar nuevas hipótesis con respecto del origen del decremento del tiempo de reacción bimodal en comparación con los tiempos de reacción unimodales.

En el modelo no-lineal del potencial evocado bimodal es posible establecer un índice global del grado de no-linealidad en base a las energías de las señales definidas en el modelo y que

posiblemente permita obtener una vista rápida del nivel de interacción entre vías. En el presente capítulo se utiliza la información proporcionada por el índice de no-linealidad para reafirmar las discusiones generadas en el capítulo VIII. En los seis experimentos, en cada ventana de análisis y en cada uno de los electrodos, se determina el índice de no-linealidad. A continuación se presenta en forma de mapas topográficos la información proporcionada por el índice de no-linealidad. Con el propósito de hacer evidente la dependencia del fenómeno intersensorial con la tarea asignada al sujeto, el índice se presenta en forma normalizada. Es decir, el color rojo se asigna al grado máximo de no-linealidad obtenido en los experimentos mientras que el color azul se asigna al valor mínimo del índice. Además de los mapas topográficos normalizados se proporcionan los valores del índice obtenidos en cada uno de los electrodos.

En la figura IX.1 se muestra el comportamiento espacial no-lineal cuando no se asigna alguna

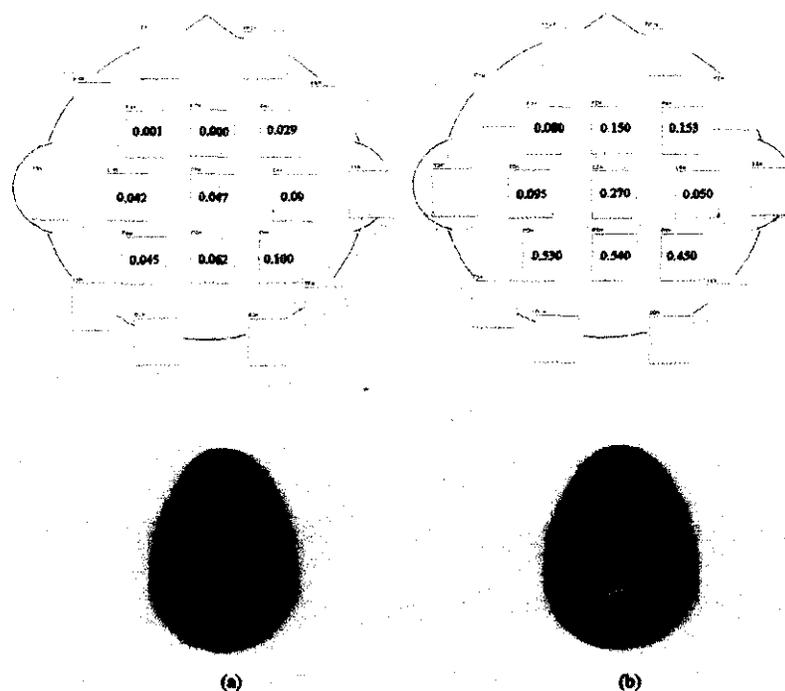


Figura IX.1. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el primer experimento.

tarea al sujeto. El mapa topográfico del índice de no-linealidad para la primera ventana de análisis, figura IX.1(a), muestra la lateralización derecha observada en la descripción de las señales del modelo en el capítulo VIII. Además, el mapa refleja que en la región parietal el fenómeno intersensorial es más intenso. Como puede observarse el mapa topográfico para la segunda ventana de análisis, figura IX.1(b), indica un fenómeno intersensorial más intenso en comparación con el originado en la primera ventana de análisis. Es evidente que bajo las condiciones del primer experimento el fenómeno intersensorial se origina principalmente en la región occipital del cerebro. Para el primer experimento el mapa topográfico cumple con su objetivo de presentar una vista rápida del fenómeno dado que el mapa coincide con los resultados obtenidos en el capítulo VIII.

La información espacial del fenómeno intersensorial reflejado por el índice de no-linealidad

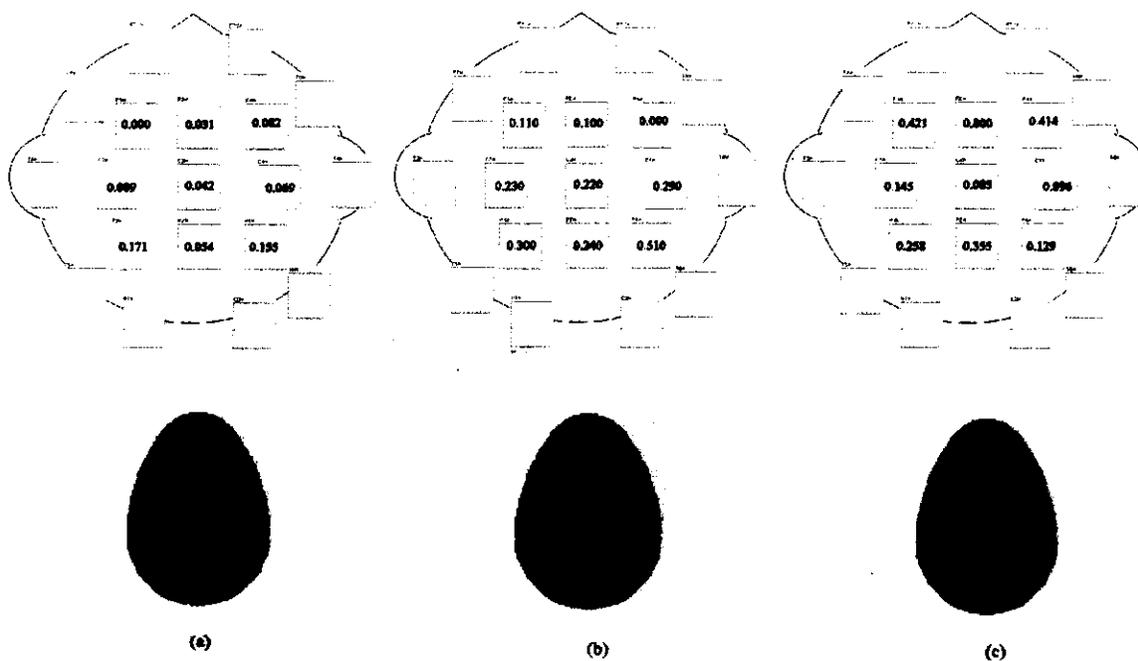


Figura IX.2. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el segundo experimento.

para el segundo experimento se presenta en la figura IX.2. En este experimento la tarea asignada al sujeto consiste en responder al estímulo visual cuando existe un estímulo auditivo accesorio. La información proporcionada por el mapa en la figura IX.2(a), correspondiente a la primera ventana de análisis, concuerda con lo establecido en el capítulo VIII en donde se indica un fenómeno intersensorial ubicado principalmente en la región parietal. Para la segunda ventana de análisis, figura IX.2(b), se muestra la intensidad del fenómeno intersensorial así como su lateralización hacia la derecha. Es evidente que el fenómeno es más intenso en la segunda ventana en comparación con los procesos de interacción generados en la tercera ventana, figura IX.2(c), sugiriendo que la presencia de un estímulo accesorio no interactúa sustancialmente con el proceso de cierre del estímulo relevante.

En la figura IX.3 se muestra el efecto de interacción al responder a la combinación de

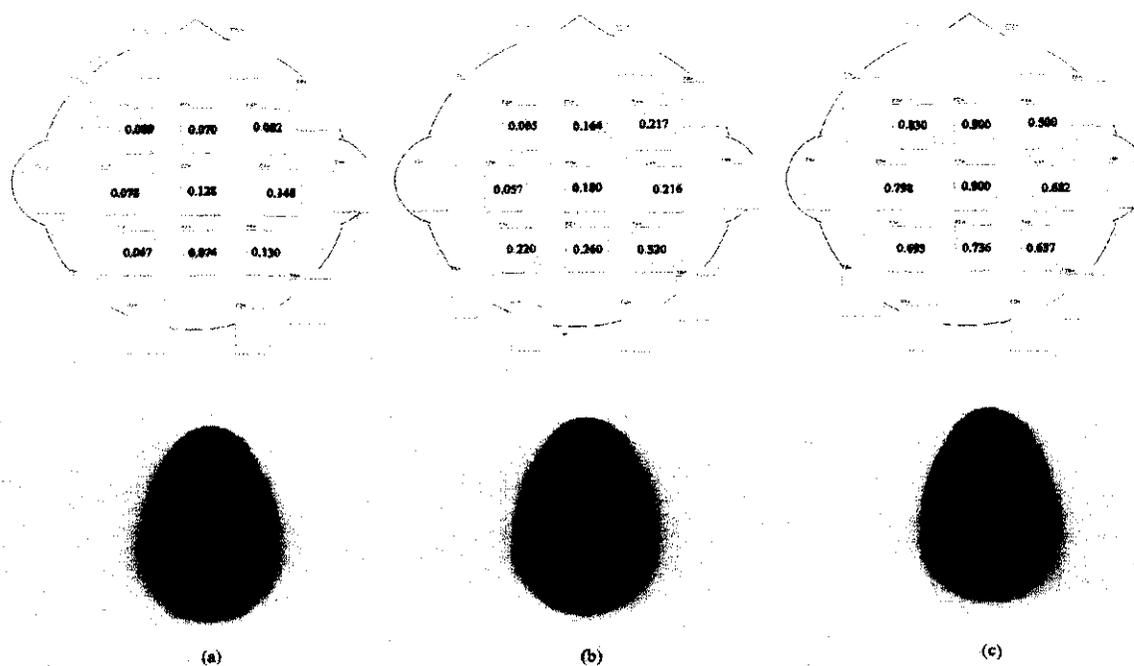


Figura IX.3. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el tercer experimento.

estímulos visual y auditivo así como a los estímulos unimodales correspondientes. De la figura IX.3(a)-(c), es evidente que el fenómeno intersensorial es más intenso en la tercera ventana de análisis sugiriendo que las vías sensoriales interactúan, proceso que se refleja en la actividad bimodal y que posiblemente explique la terminación temprana del proceso de cierre bimodal. Las distribuciones espaciales del índice no lineal para las tres ventanas coincide con lo reportado en el capítulo VIII.

El efecto de reducir la discriminabilidad de los estímulos, cuarto experimento, en el índice no-lineal se muestra en la figura IX.4(a)-(c). Como puede observarse para la primera y segunda ventana de análisis la distribución espacial e intensidad del fenómeno intersensorial son “similares” con las obtenidas en el tercer experimento. Parece ser que el decremento en la discriminabilidad de los estímulos principalmente se refleja en la interacción de las vías sensoriales en latencias que corresponden a los procesos de cierre.

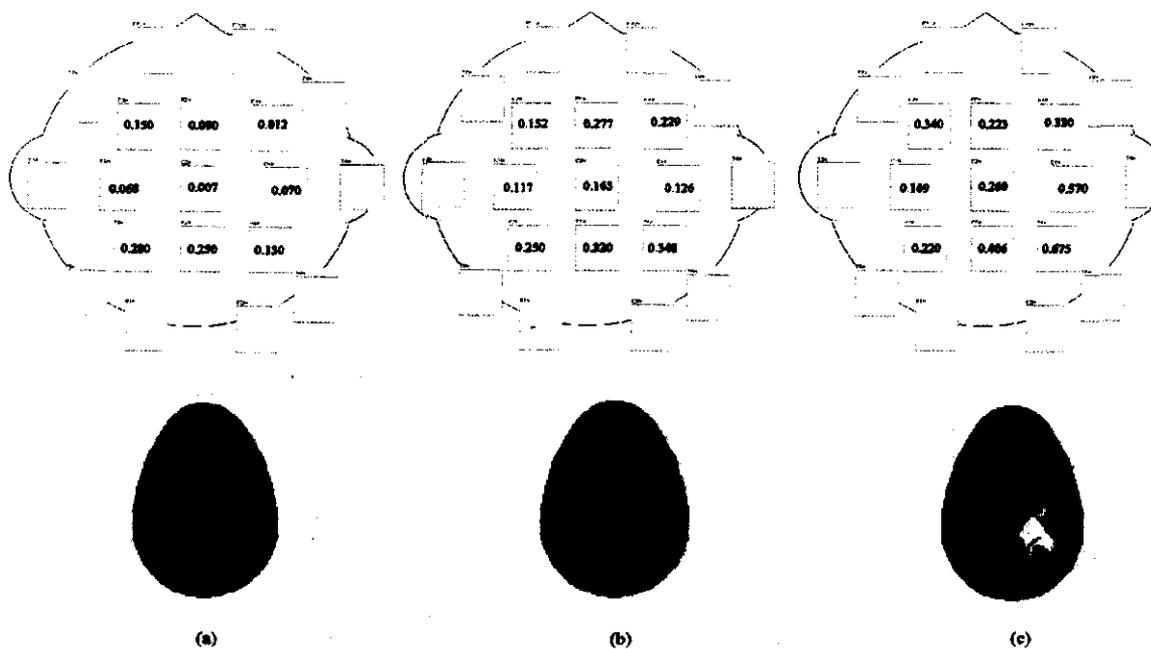


Figura IX.4. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el cuarto experimento.

En el quinto experimento se incorpora como variable de diseño en el paradigma la baja probabilidad de ocurrencia del estímulo relevante y el sujeto debe ignorar el estímulo visual. Para estas condiciones experimentales el índice no-lineal se comporta en la forma mostrada en la figura IX.5. Como puede observarse en la tarea de filtrado se obtienen interacciones sensoriales considerables en ambas ventanas de análisis. Es importante señalar que la distribución central-parietal para el índice de no-linealidad para la primera ventana de análisis, figura IX.5(a), corresponde con las observaciones realizadas en el capítulo VIII. Además, es interesante observar el efecto de la onda N400 visual, segunda ventana de análisis, en la distribución espacial del índice de no-linealidad.

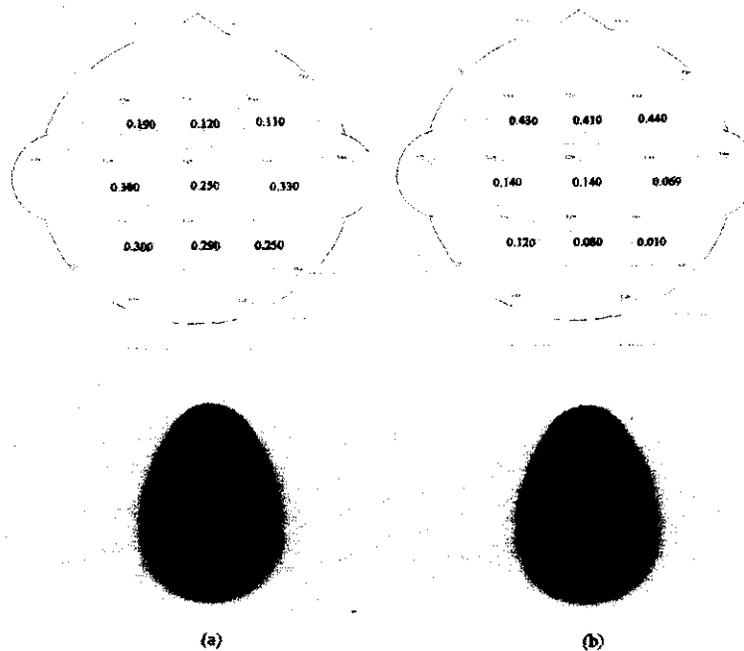


Figura IX.5. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el quinto experimento.

La figura IX.6 muestra los mapas topográficos del índice de no-linealidad cuando se utilizan estímulos que tienen una relación cognoscitiva natural. En este experimento la segunda ventana de

análisis presenta el fenómeno intersensorial más intenso, posiblemente la razón es que esta ventana incluye el proceso de categorización del estímulo auditivo y el proceso de post-categorización del estímulo visual, representado por el componente P300a. Parece ser que el proceso de categorización auditiva es acelerado por el componente visual P300a mediante una interacción del tipo no-lineal.

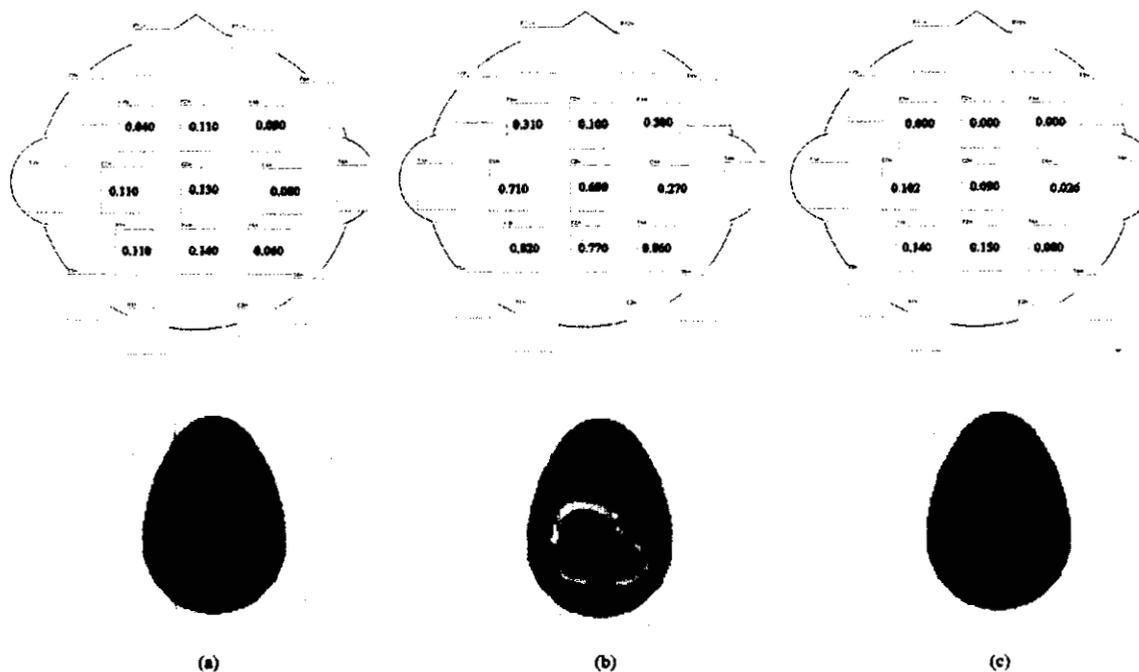


Figura IX.6. Mapas topográficos del comportamiento del índice de no-linealidad obtenido para el sexto experimento.

Como se observa en las figuras IX.1-6 el índice de no-linealidad cumple con el objetivo de proporcionar una vista rápida del fenómeno intersensorial así como las demandas neuronales impuestas por las diferentes condiciones experimentales. En este sentido el índice de no linealidad representa una figura de mérito prometedora para generar hipótesis de la relación entre vías sensoriales.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Gielen, R. A. Schmidt, and P. Van den Heuvel, "On the nature of intersensory facilitation of reaction time," *Percept. Psychophys.*, vol. 34, pp. 161-168, 1983.
- [2] T. Shipley, *Sensory integration in children: Evoked potential and intersensory functions in pediatrics and psychology*, Springfield, IL: Thomas, 1980.
- [3] R. B. Welch, and D. H. Warren, "Intersensory interactions", in *Handbook of perception and human performance. Vol. I. Sensory processes and perception*, K. R. Boff, L. Kaufman, and J. P. Thomas Eds. New York: Wiley-Interscience, 1986.
- [4] R. D. Melara, L. E. Marks, and B.C. Potts, "Primacy of dimensions in color perceptions," *J. Exp. Psychol.: Human Percept. Perform.*, vol. 19, no. 5, pp. 1082-1104, 1993.
- [5] B. Renault, N. Fiori, and S. Giambi, "Latencies of event related potentials as a tool for study motor processing organization," *Biological Psychology*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, vol. 26, pp. 217-230, 1988.
- [6] D. E. Meyer, A. M. Osman, D. E. Irwin, and S. Yantis, "Modern mental chronometry," *Biological Psychology*: North-Holland, vol. 26, pp. 3-67, 1988.
- [7] T. C. Handy, A. Kingstone, and G. R. Mangun, "Spatial distribution of visual attention: perceptual sensitivity and response latency," *Percept. Psychophys.*, vol. 58, no. 4, pp. 613-627, 1996.
- [8] E. Ben-artzi, and L. E. Marks, "Visual-auditory interaction in speeded classification: role of stimulus difference," *Percept. Psychophys.*, vol. 58, no. 8, pp: 1151-1162, 1995.
- [9] J. C. Hansen, and S. A. Hillyard, "Selective attention to multidimensional auditory stimuli," *J. Exp. Psychol.: Human Percept. Perform.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-19, 1983.
- [10] J. L. Kenemans, A. Kok, and F. T. Y. Smulders, "Event-related potentials to conjunctions of spatial frequency and orientation as a function of stimulus parameters and response requirements," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 88, pp. 51-63, 1993.
- [11] R. Naatanen, P. Paavilainen, H. Titinen, D. Jiang, and K. Alho, "Attention and mismatch negativity," *Psychophysiology*, vol. 30, pp. 436-450, 1993.
- [12] D. Regan, *Human brain electrophysiology. Evoked potential and evoked magnetic fields in science and medicine*, New York: Elsevier, 1989.
- [13] L. K. Morrell, "Sensory interaction: Evoked potential observations in man," *Experimental Brain Research*, vol. 6, pp. 146-155, 1968.

- [14] L. F. Elfner, and G. G. Bothe, "Summated vertex potentials to auditory and visual stimuli," *Biological Psychology*, vol. 4, pp. 207-212, 1976.
- [15] D. Liberati, L. Bedarida, P. Brandazza and S. Cerutti, "A model for the cortico-cortical neural interaction in multisensory-evoked potentials", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 38, no. 9, pp. 879-889, 1991.
- [16] M. Hershenson, "Reaction time as a measure of intersensory facilitation", *J. Exp. Psychology*, vol. 63, pp. 289-293, 1962.
- [17] W. G. Walter, "The convergence and interaction of visual, auditory, and tactile responses in human nonspecific cortex", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 112, pp. 320-361, 1965.
- [18] L. Ciganek, "Evoked potentials in man: Interaction of sound and light", *Electroenceph. Clin. Neurophys.*, vol. 21, pp. 28-33, 1966.
- [19] E. Eijkman, and J. Vendrik, "Can a sensory system be specified by its internal noise?", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, pp. 1102-1109, 1965.
- [20] W.G. Dougherty, G.B Jones, and G.R Engel, "Sensory Integration of Auditory and Visual Information", *Canad. J. of Psychology*, vol. 25, pp. 476-485, 1971.
- [21] N. K. Squires, E. Donchin, and K.C. Squires, "Bisensory stimulation: inferring decision-related process from the P300 component," *J. Exp. Psychol.: Human Percept. Perform.*, vol. 3, pp. 299-315, 1977.
- [22] R. S. Nickerson, "Intersensory facilitation of reaction time," *Psychological review*, vol. 80, pp. 489-509, 1973.
- [23] T. Shipley, "Evoked brain potentials and sensory interaction in retarded child," *Am. J. Ment. Defic.* vol. 74, pp. 517-523, 1970.
- [24] T. Shipley, and M. Hyson, "Amplitude decrements in brain potentials in man evoked by repetitive auditory, visual, and intersensory stimulation," *Sensory processes*, vol. 1, pp. 338-353, 1977.
- [25] M. P. Lynch, R. E. Eilers, D. K. Oller, R. C. Urbano, and P. J. Pero, "Multisensory narrative tracking by a profoundly deaf subject using an electrocutaneous vibrator and a vibrotactile aid," *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 32, pp: 331-338, June 1989.
- [26] P. J. Holcomb, and J. E Anderson, "Cross-modal semantic priming: a time-course analysis using event-related brain potentials," *Language and cognitive processes*, vol. 8, no. 4, pp. 379-411, 1993.

[27] P. J. Holcomb, S. A. Coffey, and H. J. Neville, "Visual and auditory sentence processing: a developmental analysis using event-related brain potentials," *Developmental Neuropsychology*, vol. 8, pp. 203-241, 1992.

[28] S. A. Hillyard, and T. F. Munte, "Selective attention to color and location: an analysis with event-related brain potentials," *Percept. Psychophys.*, vol. 36, no. 2, pp. 185-198, 1984.

[29] P. Duchnowski, D. S. Lum, J. C. Krause, M. G. Sexton, M. S. Bratakos, and L. D. Braida, "Development of speechreading supplements based on automatic speech recognition," *IEEE Trans. Biomed Eng.*, vol. 47, no. 4, pp. 487-496, 2000.

[30] A. W. K. Gaillard, "Problems and paradigms in ERP research," *Biological Psychology*, vol. 26, pp. 91-109, 1988.

[31] S. A. Hillyard, and M. Kutas, "Electrophysiology of cognitive processing," *Ann. Rev. Psychol.*, vol. 34, pp. 33-61, 1983.

[32] R. Klorman, "Cognitive event-related potentials in attention deficit disorder," *Journal of learning disabilities*, vol. 24, no. 3, pp. 130-140, 1991.

[33] R. Naatanen, "Implications of ERP data for psychological theories of attention," *Biological Psychology*, vol. 26, pp. 117-163, 1988.

[34] G. P. Novak, W. Ritter, H. G. Vaughan, Jr. and M. L. Wiznitzer, "Differentiation of negative event-related potentials in an auditory discrimination task," *Electroenceph. Clin. Neuroph.*, vol. 75, pp. 225-275, 1990.

[35] S. A. Hillyard, G. V. Simpson, D. L. Woods, S. Van Voorhis, and T. F. Munte, "Event-related brain potentials and selective attention to different modalities," in *Cortical integration*, New York: F. Reinoso-Suarez and C. Ajmone-Marsan Eds, Raven Press, 1984.

[36] A. F. Kramer, and D. L. Strayer, "Assessing the development of automatic processing: an application of dual-task and event-related brain potential methodologies," *Biological Psychology*, vol. 26, pp. 231-267, 1988.

[37] R. Naatanen, "The mismatch negativity: a powerful tool for cognitive neuroscience," *Ear & Hearing*, vol. 16, pp. 6-18, 1995.

[38] G. Novak, W. Ritter, and H. G. Vaughan, "Mismatch detection and the latency of temporal judgments," *Psychophysiology*, vol. 29, no. 4, pp. 398-411, 1992.

[39] M. Kutas, H. J. Neville, and P. J. Holcomb, "A preliminary comparison of the N400 response to semantic anomalies during reading, listening and signing," *The London Symposia (EEG Suppl. 39)*, R. J. Ellingson, N. M. F. Murray, and A. M. Halliday, Eds., Elsevier Science Publisher, 1987.

[40] B. Renault, "The visual emitted potentials: clues for information processing," *Tutorials in ERP research: endogenous components*. A. W. K. Gaillard and W. Ritter, Eds., North-Holland Publishing Company, 1983.

[41] R. Naatanen, M. Simpson, and N. E. Loveless, "Stimulus deviance and evoked potentials," *Biological Psychology*, vol. 14, pp. 53-98, 1982.

[42] A. S. Gevins, and B. A. Cutillo, "Signals of cognition," *Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology-Vol. 2*, New York: Elsevier, 1986.

[43] F. H. Previc, and M. R. Harter, "Electrophysiological and behavioral indicants of selective attention to multifeature gratings," *Percep. Psychophys.*, vol. 32, no. 5, pp. 465-472, 1982.

[44] D. L. Woods, K. Alho, and A. Algazi, "Intermodal selective attention. I. Effects on event-related potentials to lateralized auditory and visual stimuli," *Electroenceph. Clin. Neuroph.*, vol. 82, pp. 341-355, 1992.

[45] K. Alho, D. L. Woods, and A. Algazi, "Processing of auditory stimuli during auditory and visual attention as reveal by event-related potentials," *Psychophysiology*, vol. 31, pp. 469-479, 1994.

[46] L Ljung, *System Identification*. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

[47] A. Juditsky, H. Hjalmarsson, A. Benveniste, B. Delyon, L. Ljung, J. Sjöberg and Q. Zhang, "Nonlinear Black-box Models in System Identification: Mathematical Foundations", *Automatica*, vol. 31 (12), pp. 1725-1750, 1995.

[48] M.J. Korenberg and I. W. Hunter, "The identification of nonlinear biological systems: Volterra kernel approaches", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 24, pp. 250-268, 1996.

[49] G. Vandersteen, Y. Rolain, J. Schoukens, and R. Pintelon, "On the use of system identification for accurate parametric modeling of nonlinear systems using noisy measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, no. 2, pp. 605-609, 1996.

[50] V. J. Mathews, "Adaptive polynomial filters," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 10-26, 1991.

[51] K. H. Chon, T. J. Mullen, and R. J. Cohen, "A dual-input nonlinear system analysis of autonomic modulation of heart rate," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 43, no. 5, pp. 530-543, 1996.

[52] S. A. Billings, and W. S. F. Voon, "A prediction-error and stepwise-regression estimation algorithm for non-linear systems," *Int. J. Control*, vol. 44, no. 3, pp. 803-822, 1986.

[53] H. Zhan, and S. A. Billings, "Gain bounds of higher-order nonlinear transfer functions," *Int. J.*

Control, vol. 64, no. 4, pp. 767-773, 1996.

[54] J. Sjöberg, Q. Zhang, L. Ljung, A. Beneviste, B. Delyon, P. Y. Glorennes, H. Hjalmarsson, and A. Juditsky. "Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview," *Automatica*, vol. 31, pp. 1691-1724, 1995.

[55] S. Chen, S.A. Billings, and W. Luo, "Orthogonal least squares methods and their application to non-linear system identification," *Int. J. Control.*, vol. 50, no. 5, pp. 1873-1896, 1989.

[56] H. Jang, and K. Kim, "Identification of loudspeaker nonlinearities using the NARMAX modeling technique," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, no. 1/2, 1994.

[57] S. Chen, S. A. Billings, C. F. N Cowan, and P. M. Grant, "Practical identification of NARMAX models using radial basis functions," *Int. J. Control.*, vol. 52, no. 6, pp. 132-1350, 1990.

[58] S. A. Billings, and Q. M. Zhu, "A structure detection algorithm for nonlinear dynamic rational models," *Int. J. Control.*, vol. 59, no. 6, pp. 1439-1463, 1994.

[59] R. Haber, and H. Unbehauen, "Structure identification of nonlinear dynamic systems-A survey on input/output approaches," *Automatica*, vol. 16, pp. 651-677, 1990.

[60] S. A. Billings, and Q. M. Zhu, "Model validation tests for multivariable nonlinear model including neural networks," *Int. J. Control.*, vol. 62, no. 4, pp. 749-766, 1995.

[61] L. A. Aguirre, and S. A. Billings, "Improved structure selection for nonlinear models based on term clustering", *Int. J. Control.*, vol. 62, no. 3, pp.569-587, 1995.

[62] J. C. Peyton-Jones, and S. A. Billings, "Recursive algorithm for computing the frequency response of a class of non-linear difference equation models," *Int. J. Control.*, vol. 50, no. X, pp.1925-1940, 1989.