



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRÍA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGÍA)
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

**PERCEPCIÓN DE ESTÍMULOS TEMPORALES REGULARES E IRREGULARES
EN ENSAYOS ÚNICOS EN HUMANOS**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA

MARINA FUENTES DÁVILA

TUTOR PRINCIPAL

DR. VÍCTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR

DR. LUIS ALBERTO TELLEZ LIMA
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

DR. LUIS ALONSO LEMUS SANDOVAL
INSTITUTO DE FISILOGÍA CELULAR, UNAM

JURIQUILLA, QUERÉTARO (INB)

MÉXICO, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

PERCEPCIÓN DE ESTÍMULOS TEMPORALES REGULARES E IRREGULARES EN ENSAYOS ÚNICOS EN PRIMATES

A pesar de la importancia de percibir y estimar la regularidad temporal en una secuencia de eventos sensoriales repetitivos, no se conoce el mecanismo de procesamiento de los estímulos detrás de esto por lo que se plantearon dos posibles hipótesis para la toma de decisiones de este tipo; una propone que se espera una única desviación temporal grande dentro del estímulo, mientras que la otra plantea un mecanismo en el que se toma en cuenta la evidencia generada a lo largo de todo el estímulo, la cual se va acumulando y sumando hasta que se toma una decisión.

Para probar las dos posibles hipótesis, programamos un modelo capaz de predecir con alta eficiencia qué responderán los sujetos en una tarea de discriminación de regularidad y en cuánto tiempo lo harán, ensayo por ensayo.

En la tarea de discriminación los sujetos tenían que percibir trenes de pulsos sensoriales (visuales, auditivos o táctiles) y decidir si aparecían en intervalos regulares o irregulares. En nuestro modelo compiten dos procesos simultáneos; se toma una decisión irregular cuando una variable de decisión irregular alcanza el umbral superior de decisión y la variable de decisión regular se desplaza hacia el umbral inferior si a lo largo del estímulo no hay suficiente evidencia a favor de la irregularidad.

Después de probar ambas hipótesis utilizando nuestro modelo, ensayo por ensayo para cada uno de los participantes, los resultados sugieren que la estrategia implementada en todos los casos siempre es la misma y en lugar de esperar una única desviación temporal grande en el estímulo, los participantes en cada ensayo acumulan evidencia a favor de la irregularidad (cuando la diferencia entre la duración del intervalo actual y la duración del anterior es diferente de cero) durante todo el estímulo, y si la cantidad de evidencia sobrepasa un umbral se toma una decisión irregular. Después de comparar ensayo por ensayo y obtener los valores

óptimos de cada parámetro del modelo para cada sujeto, las curvas psicométricas y cronométricas del modelo tuvieron un muy buen ajuste con las de los datos conductuales de los sujetos. Podemos asegurar que nuestro modelo es un buen predictor de esta tarea de discriminación de regularidad y por tanto reforzar la hipótesis de que nuestro cerebro evalúa todos los estímulos y acumula evidencias de irregularidad para tomar una decisión de este tipo.

ABSTRACT

PERCEPTION OF REGULAR AND IRREGULAR STIMULI IN SINGLE TRIALS IN HUMANS

Despite the importance of perceiving and estimating the temporal regularity in a sequence of repetitive sensory events, the mechanism behind this is not known, so two possible hypotheses were proposed for making decisions of this type; one proposes that a single large temporary deviation is expected within the stimulus, while the other proposes a mechanism in which the evidence generated throughout the entire stimulus is taken into account, which is accumulated and added until it is taken a decision.

To test the two possible hypotheses, we programmed a model capable of predicting with high efficiency what the subjects will respond in a regularity discrimination task and in how long they will do so, trial by trial.

In the discrimination task the subjects had to perceive trains of sensory pulses (visual, auditory, or tactile) and decide whether they appeared at regular or irregular intervals. In our model two simultaneous processes are competing; an irregular decision is made when an irregular decision variable reaches the upper decision bound and the regular decision variable moved towards the lower bound if throughout the stimulus there is not enough evidence in favor of the irregularity.

After testing both hypotheses using our model, trial by trial for each participant, the results suggest that the strategy implemented in all cases is always the same and instead of waiting for a single large temporary deviation in the stimulus, the participants in each trial they accumulate evidence in favor of irregularity (when the difference between the duration of the current interval and the duration of the previous one is different from zero) throughout the stimulus, and if the amount of evidence exceeds a threshold, an irregular decision is made. After comparing trial by trial and obtain the optimal values of each parameter of the model (bounds, noise, slope, and decay constant of the accumulated evidence) for each subject, the

psychometric and chronometric curves of the model and the subjects had a very good fit. We can assure that our model is a good predictor of this regularity discrimination task and therefore reinforce the hypothesis that our brain could evaluate all the stimulus and accumulates evidence of irregularity in order to make a decision of this type.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto fue realizado en el Laboratorio de Sistemas Sensoriales y Planeación Motora, B-05, en el Instituto de Neurobiología de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la tutoría del Dr. Víctor Hugo de Lafuente Flores.

Este proyecto fue financiado por CONACYT a través del proyecto 319112 y por el PAPIIT (IG200521).

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Neurobiología-UNAM (INB), Campus Juriquilla, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional a través del Programa de Posgrados (Programa de Maestría en Ciencias en Neurobiología) y por permitirme aprender tanto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca nacional que ha sido de gran apoyo para lograr la culminación de la maestría (CVU: 1083193).

A la Dra. Maricela Luna Muñoz y a la Dra. Nuri Aranda López de la Unidad de Enseñanza por ayudarnos, apoyarnos incondicionalmente y aguantarnos a pesar de que las volvimos locas con tantas preguntas; no hubiéramos sobrevivido a los trámites sin ustedes.

Al M. en C. Edgar Bolaños por su apoyo en este trabajo.

A los miembros de mi Jurado de tesis, Dra. María Florencia Assaneo, Dr. Pavel Ernesto Rueda Orozco y Dr. Octavio César García González, por su tiempo, sus comentarios y observaciones para mejorar este trabajo.

A los miembros de mi comité tutor, Dr. Luis Alberto Tellez Lima y el Dr. Luis Alonso Lemus Sandoval por la asesoría y el apoyo en la realización de este proyecto de tesis, pero especialmente gracias por los comentarios y las enseñanzas que me ayudaron a mejorar en mi trabajo y en mi formación.

A mi tutor el doc Víctor, por confiar en mí, por retarme, por inculcarme el amor por la programación y por siempre contagiarme de tu pasión por la ciencia, por MATLAB y por este proyecto.

A todas las integrantes del lab, Marisol, Mili, Adri, Ana y Kar que más que compañeras se volvieron mis amigas. Gracias por las risas, por siempre compartir sus conocimientos y ayudarme cuando lo necesitaba, por ser tan amables, solidarias y permitir un ambiente amable y cobijador en el día a día. Marisol se merece un agradecimiento particular por tanto apoyo, disposición, paciencia y amabilidad cuando tenía dudas de cualquier cosa o necesitaba ayuda con el proyecto.

Agradezco infinitamente a mis papás Antonio y Adriana por apoyarme en todos mis sueños y locuras, por amarme incondicionalmente y por dejarme ser; este es su logro. A Monse por ser mi persona y por inspirarme a ser mejor siempre y también al Roris por ser un gran cuñado. A Papush por siempre estar para mí, amarme e impulsarme en todo. A la memoria de Mamush y de la abuela Jose por ser junto con Papush los mejores abuelos que pude pedir. A la tía Mary por tanto amor. A Carlos, eres la mejor y más bonita sorpresa que la vida me ha dado; gracias por los buenos momentos, el aprendizaje y por tu apoyo y amor incondicional. A Cris, Paty y Carlos, por su cariño y su cálido recibimiento a su familia.

A toda mi familia, primos y tíos por su cariño y por estar a pesar de la distancia.

A todos mis amigos; a los que tuve la fortuna de conocer en esta increíble aventura (Ángel alias el crayoli, Barbs, Bere, Ceci, Damni, Denissita, Dina, Ireri, Jalil, Jared, Jose, Lau, Lupita, Manuel, Morita, Pepes, Poblano y Zac), y a los nada nuevos (Ana, Dani, Nat, Ursu, Sebito, Estivi, Juan Pablin, Fer, Sami, Erikiux, Clau, Pau, Bego, Ana Isabel, Veriux, Marianiux, Sandriux, Rubicita, Anto, Analuz, Ericcin, Daniel, Panchito, Chachis, Richi, Carlangas, Arí, Lore, María, Andre, Diego y Pablo) por tantos momentos de risa, apoyo, solidaridad y cariño, soy muy afortunada de tenerlos conmigo; son la familia que elegí.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	3
Agradecimientos.....	5
1. Introducción.....	8
2. Antecedentes.....	10
2.1 Procesamiento de información temporal.....	11
2.2 Percepción temporal en primates.....	12
2.3 Percepción de irregularidad temporal.....	15
3. Hipótesis.....	17
4. Objetivos.....	18
4.1 Objetivo general.....	18
4.2 Objetivos específicos.....	18
5. Estrategia experimental.....	19
5.1 Tarea de detección de irregularidades en humanos.....	19
5.2 Análisis de datos y construcción del modelo.....	22
6. Resultados.....	26
6.1 Efecto de los parámetros sobre el modelo.....	26
6.2 Ajuste del modelo.....	34
7. Discusión.....	46
8. Conclusión.....	47
Referencias.....	48

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos los humanos han tenido conciencia del transcurso del tiempo (Gruart et al. 2002); pero esto no es un fenómeno exclusivo del hombre ya que todos los animales y plantas miden de alguna forma el paso del tiempo. Ser capaz de medir, calcular el tiempo y darle una ritmicidad a los procesos cotidianos tiene repercusiones en la conducta, la ecología y en la capacidad de sobrevivencia de los organismos. En los humanos en particular, percibir la regularidad temporal y el ritmo es una habilidad fundamental en diversas actividades relacionadas con el comportamiento social que van desde las magnitudes de microsegundos hasta los ritmos circadianos y cuyos mecanismos cerebrales subyacentes son diversos y específicos (Merchant & de Lafuente, 2014).

En la literatura es común encontrarnos con la mención del tiempo subjetivo y del tiempo objetivo; dos vertientes que, si bien no se contraponen recurren a distintas formas de medición (García Maldonado et al, 2011). El tiempo objetivo se refiere a un constructo social que toma como referencia eventos ambientales regulares y relevantes que hacen uso de instrumentos como relojes y cronómetros para su medición (Gruart 2002); mientras que el tiempo subjetivo es el derivado de la percepción de tiempo de cada individuo que se encuentra supeditado a los mecanismos corporales, cognitivos y nerviosos propios del organismo. Éste último, también conocido como reloj interno, puede ser distorsionado y pasar subjetivamente más rápido o lento debido a una variedad de factores sensoriales, psicológicos y fisiológicos (Allman et al, 2013).

Los parámetros temporales son fundamentales para la percepción de nuestro entorno y el mecanismo de sincronización implicado en la escala de milisegundos está ligado a diversos comportamientos que incluyen la percepción y producción del habla, la música y la danza, así como en los deportes y en la estimación del tiempo (Merchant & Georgopoulos, 2006). Por otra parte, nuestra habilidad para cronometrar eventos externos en el rango de segundos a minutos nos permite experimentar el paso del tiempo físico y nos permite integrar secuencias de acción,

pensamientos, y comportamientos mediante la detección de tendencias emergentes y la anticipación de resultados futuros (Bechara et al., 1996; Kotz et al., 2009; Nussbaum et al., 2006).

Pese a la importancia de entender la percepción del tiempo que nos permite generar representaciones temporales para adaptarnos a un entorno en constante cambio, los mecanismos mediante los cuales esto sucede aún son una incógnita. En este trabajo buscamos esclarecer cómo es que estos mecanismos nos permiten percibir estructuras temporales complejas como los ritmos, en el orden de milisegundos a segundos y anticiparnos a ellos. Específicamente, analizamos las diferencias en el procesamiento de este tipo de estímulos a nivel individual, y si la sensibilidad, así como el tiempo de reacción de cada sujeto es similar para distintas modalidades sensoriales y ante distintas duraciones de intervalos.

A partir de los resultados obtenidos en un estudio previo de percepción de irregularidad en humanos (*Homo sapiens*) (Espinoza & de Lafuente, 2021) se analizó el desempeño de los participantes en ensayos únicos, poniendo a prueba dos posibles hipótesis del mecanismo involucrado en la toma de decisiones al momento de percibir y estimar la regularidad temporal en una secuencia de eventos sensoriales repetitivos. La hipótesis de detección propone que se espera una única desviación temporal de gran magnitud dentro del estímulo, mientras que la hipótesis de acumulación plantea un mecanismo en el que se toma en cuenta la evidencia generada a lo largo de todo el estímulo, la cual se va acumulando y sumando hasta que se toma una decisión.

2. ANTECEDENTES

Vivimos en un ambiente cambiante que posee ciclos rítmicos repetitivos que son parte de la vida de todos los organismos; la mayoría presentan actividades biológicas que se repiten a lo largo del tiempo y que tienen una periodicidad definida (Gruart et al. 2002). Por lo tanto, es lógico pensar que para poder competir y adaptarse de forma efectiva a cualquier entorno, la conducta y el comportamiento también deben seguir una secuencia rítmica y por lo tanto es necesaria la presencia de estructuras internas del sistema nervioso capaces de generar oscilaciones biológicas que proporcionen indicios de tiempo a los cuales se les ha denominado relojes biológicos (Gruart et al., 2002). El principal reloj biológico se encuentra en el núcleo supraquiasmático (NSQ) del hipotálamo, aunque también se han identificado osciladores periféricos en células de diversos tejidos que cuentan con un sistema autosostenido en el que la expresión de ciertos genes les confiere a las células de estas estructuras la capacidad para oscilar (Dardente & Cermakian, 2007; Hastings et al., 2018). Para lograr una sincronización entre la actividad cerebral, los ritmos endógenos y el medio ambiente tenemos “relojes externos” que son sumamente necesarios para la supervivencia ya que además de regular ritmos también tienen la capacidad de medir el tiempo (García-Maldonado et al., 2011).

Una de las tareas facilitadas por nuestro reloj biológico es el arrastre rítmico, que se refiere a la capacidad de percibir el pulso que marca puntos igualmente espaciados en la música o una secuencia de estímulos auditivos y, luego, alinear las acciones motoras con ese pulso o latido (Large & Palmer, 2002). La capacidad de percibir este pulso y sincronizarse con él (por ejemplo, dando golpecitos con los pies o bailando) es una habilidad de los primates que es muy común especialmente en humanos (Merchant & Honing, 2014).

2.1 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN TEMPORAL

A pesar de que la dimensión temporal suele separarse en cuatro categorías de acuerdo con el orden de magnitud del tiempo, hay autores que agrupan la escala de los milisegundos con la de segundos, minutos y horas, en una sola categoría nombrada como tiempo de intervalo o *timing intervalar* (Merchant & de Lafuente, 2014). El modelo de procesamiento de información para esta categoría temporal está basado en el funcionamiento del reloj biológico interno para medir el tiempo psicológico a partir de tres procesos que involucran a la memoria y a la toma de decisiones (Buhusi & Meck, 2005).

El modelo propone lo siguiente: al presentarse un estímulo, un marcapasos (generado gracias a propiedades oscilatorias de neuronas corticales) (Hastings et al., 2018) emite pulsos que se van acumulando (esto quiere decir que la duración de cada pulso se va sumando con la de los otros pulsos) gracias a un proceso atencional y que se almacenan en la memoria de trabajo; la información de los pulsos recibidos se compara con valores previamente almacenado en la memoria de referencia durante ese evento particular. Cuando los dos valores son lo suficientemente cercanos y parecidos, una regla de decisión opera para producir una estimación del tiempo, que puede verse influida por la retroalimentación (Church 1984; Gibbon et al. 1984; Treisman 1963).

Hay evidencia neurofisiológica de la existencia de un sistema de procesamiento de tiempo en el que los procesos de temporización son dependientes de la tarea; demostrando que las estructuras neurales específicas que serán reclutadas para el procesamiento temporal se pueden determinar, al menos parcialmente, por la forma en que se presenta la información de tiempo (Merchant et al. 2007; Jantzen et al. 2004). Los estudios de imágenes funcionales por resonancia magnética han demostrado que los ganglios basales, el cerebelo y diferentes estructuras corticales, incluida el área motora suplementaria, la corteza prefrontal y parietal posterior forman un circuito neural involucrado en la información temporal (Allman et al. 2013).

2.2 PERCEPCIÓN TEMPORAL EN PRIMATES

Las dimensiones espaciales y temporales están íntimamente relacionadas ya que los cambios de los objetos en el espacio son dinámicos y cambiantes por lo que están directa e inevitablemente ligados al tiempo (Call, 2000). Para comprender la base neuronal del procesamiento espacial, el primate no humano estudiado con más frecuencia es el macaco, debido a su notable capacidad para tratar la información espacial, y su similitud psicofísica con sujetos humanos en aspectos de percepción, cognición y motriz (Romo et al., 2000; Merchant et al., 2003; Georgopoulos et al., 1993). Se han diseñado una serie de experimentos neurofisiológicos y psicofísicos en macacos que han permitido descubrir la organización funcional de los circuitos neuronales que median el procesamiento espacial. Los mismos procedimientos experimentales podrían ser válidos para estudiar la base neural del procesamiento del tiempo (Allman et al., 2013). De hecho, se ha encontrado que la sincronización de intervalo único y el comportamiento visuoespacial son similares en todos los primates (Mendez et al., 2011; Zarco et al., 2009).

Estudios de imágenes funcionales en humanos han revelado que el circuito motor cortico-ganglio basal-tálamo-cortical, involucrado en el procesamiento temporal y de secuencias, también está relacionado con comportamientos rítmicos (Harrington et al., 1998). Sin embargo, otras investigaciones también han demostrado que esto no es exclusivo de humanos y que en macacos este mismo circuito participa en los aspectos perceptivos y motores relacionados con el tiempo (Merchant et al., 2013).

La negatividad de desajuste (MMN por sus siglas en inglés) es una respuesta cerebral que se presenta cuando en una secuencia de estímulos sensoriales (típicamente en el dominio auditivo) con cierto patrón o regla establecida, es detectada una variación en este patrón previamente establecido; refleja la capacidad del cerebro para realizar comparaciones automáticas entre estímulos consecutivos y proporciona un índice electrofisiológico de aprendizaje sensorial y precisión perceptual (Garrido et al., 2009). En un estudio de expectativa rítmica en

el que se utilizó el componente de MMN como un índice de la violación a la expectativa rítmica, se probó que los monos Rhesus no son capaces de detectar el latido en un estímulo auditivo complejo, aunque pueden detectar el inicio de un grupo rítmico (Honing, 2012). De hecho, otra evidencia de que los monos son sensibles a ritmos simples es un artículo que mostró que los macacos presentan cambios en la mirada y en sus expresiones faciales cuando se presenta una modificación de una secuencia rítmica regular (Selezneva et al., 2013).

Los macacos también pueden cuantificar con precisión intervalos individuales y realizar secuencias de movimiento complejas. En una tarea de sincronización motora de tiempo aplicada a humanos y a monos Rhesus, que consistía en repetir conjuntos de intervalos que iban en rangos de los 450 a los 100 ms y evaluaban estímulos tanto visuales como auditivos, se encontró que en ambas especies el desempeño fue equivalente durante la producción de intervalos simples y la sincronización de *tapping* con un metrónomo, algo que no se cumplió para intervalos múltiples, donde los humanos fueron más precisos y mostraron menos variabilidad temporal. Además, los macacos pueden sincronizarse en el dominio visual, pero muestran menos sensibilidad en el auditivo (Zarco et al. 2009). Los resultados de este estudio indican que el mono Rhesus es un buen modelo para el estudio de la base neuronal de la producción del tiempo, pero también resaltan la existencia de distintas habilidades temporales de los humanos que no se comparten con los macacos.

En otro estudio (García-Garibay et al. 2016) se realizó la caracterización de macacos y humanos para percibir y mantener diferentes ritmos en ausencia de pistas sensoriales o acciones motoras, donde los sujetos tenían que observar y seguir internamente un estímulo visual que periódicamente cambiaba su ubicación dentro de un perímetro circular, y para poder predecir correctamente la posición del estímulo una vez que este desaparecía, los sujetos tenían que hacer uso de un cronómetro interno. Encontrando que la probabilidad de permanecer en sincronía con el ritmo disminuyó y la variabilidad en las estimaciones del tiempo aumentó en función del tiempo transcurridos y los humanos tendieron a quedarse atrás de los

ritmos rápidos y adelante en los lentos, lo que sugiere que podemos estar incorporando un tiempo medio como información previa, concluyendo que la percepción y el mantenimiento de ritmos son habilidades cognitivas que compartimos con los macacos y que no dependen de comandos motores.

Por otro lado, a partir de la hipótesis de la evolución audiomotora gradual (Merchant & Honing, 2014) se ha sugerido que únicamente los humanos presentan sincronización de pulsos, pero ha sido una característica dada por un desarrollo gradual por lo que si se comparte con otros primates el tiempo basado en intervalos. Esta hipótesis ayuda a explicar el hecho de que el desempeño en macacos es comparable al de los humanos en tareas de intervalo único (como reproducción, categorización e intercepción de intervalo), pero sólo los humanos son capaces de realizar tareas de intervalo múltiple (como arrastre rítmico, sincronización y continuación) (Merchant et al, 2007).

2.3 PERCEPCIÓN DE IRREGULARIDAD TEMPORAL

Espinoza-Monroy y de Lafuente (2021) evaluaron la sensibilidad de participantes humanos para distinguir entre estímulos Regulares e Irregulares tomando en cuenta los efectos de tres modalidades sensoriales distintas (auditiva, visual y táctil) así como la Duración Media de los intervalos. También evaluaron las posibles reglas de operación subyacentes a la decisión perceptual tomada por los participantes frente a la información temporal presentada en los estímulos durante la ejecución de la tarea.

En el estudio encontraron que en humanos el sistema auditivo es más sensible a las irregularidades que el visual y el táctil; para las tres modalidades, entre mayor fue el intervalo de irregularidad, mejor fue el desempeño. Las funciones psicométricas y cronométricas de la ejecución general mostraron que existe una mayor facilidad y rapidez de respuesta para identificar ritmos con mayores porcentajes de irregularidad. También se encontró que las diferencias psicométricas en función de la Duración Media de los estímulos tienen diferencias menores y más sutiles (Figura 1).

Para identificar las reglas de operación que podían estar llevando a los participantes a emitir cierta respuesta frente a determinados estímulos, se generó un modelo computacional para calcular la evidencia de regularidad o irregularidad en los estímulos. Los datos del modelo arrojaron evidencia de que la hipótesis de acumulación de evidencia es la que mejor se ajusta al momento de tomar decisiones perceptuales como las presentadas en la tarea.

En el presente trabajo construimos este mismo modelo, pero en lugar de analizar los resultados en función de los promedios calculados de todos los participantes, como se hizo en el trabajo anterior, nosotros analizamos los datos como ensayos únicos. Esto nos permitió poner a prueba el funcionamiento y la precisión del modelo para poder determinar el mecanismo detrás de la toma de decisiones ante estímulos perceptuales regulares o irregulares.

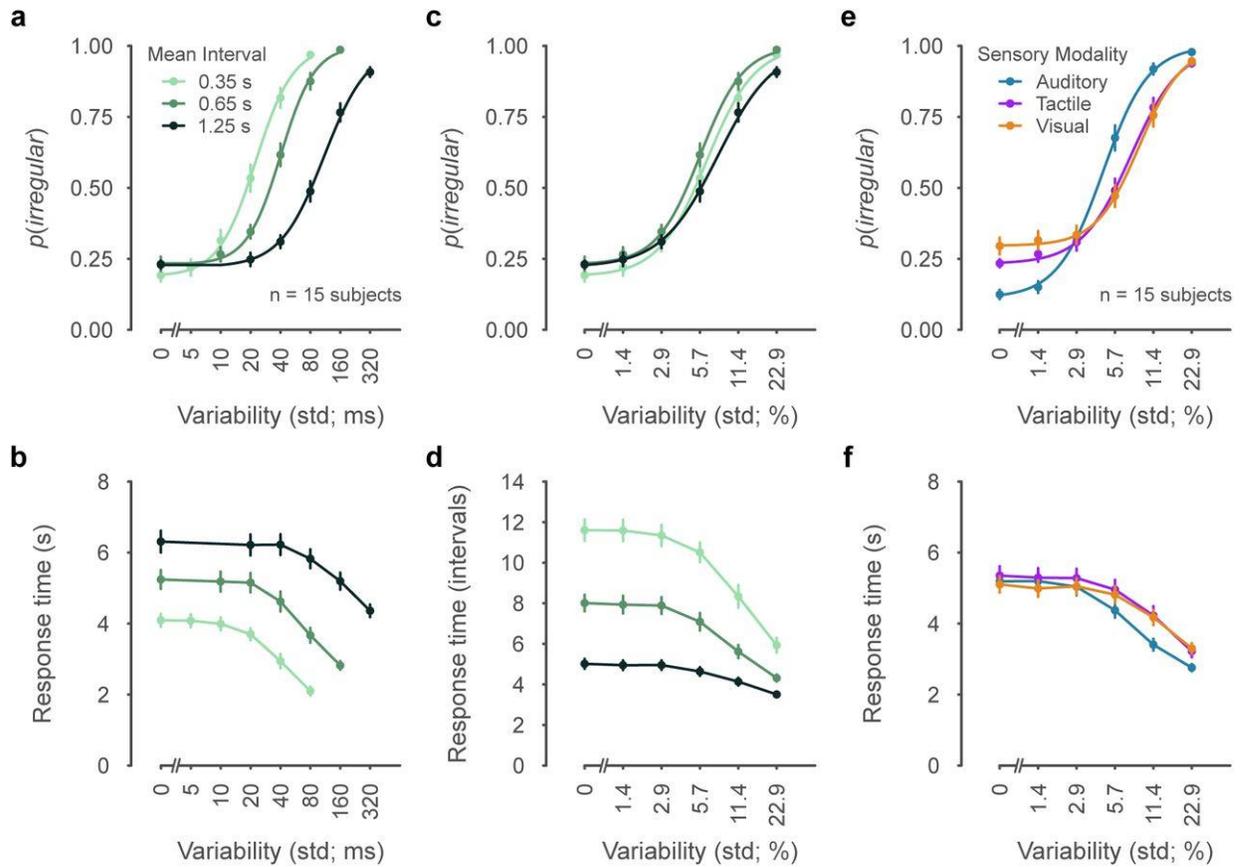


Figura 1. Curvas psicométricas y cronométricas obtenidas a partir del promedio de todos los ensayos y participantes. (a) Curva psicométrica de la probabilidad de una respuesta irregular en función del intervalo de variabilidad. (b) Curva cronométrica del tiempo de respuesta en función del intervalo de variabilidad. (c) Curva psicométrica de la probabilidad de una respuesta irregular en función del intervalo de variabilidad expresado en porcentaje. (d) Curva cronométrica del tiempo de respuesta en función del intervalo de variabilidad expresado en porcentaje. (e) Curva psicométrica en función de la Modalidad Sensorial. (f) Curva cronométrica en función de la Modalidad Sensorial. (Espinoza-Monroy & de Lafuente,2021).

3. HIPÓTESIS

Con el modelo computacional construido podremos predecir lo que los sujetos van a contestar en la tarea de discriminación (Regular o Irregular) y en cuánto tiempo lo van a contestar en una tarea de percepción de irregularidades, ensayo por ensayo.

Con nuestro modelo se pondrán a prueba dos posibles mecanismos subyacentes a la toma de decisiones de percepción de irregularidad de estímulos; el de detección propone que se espera una única desviación temporal grande dentro del estímulo, mientras que el de acumulación plantea que se toma en cuenta la evidencia generada a lo largo de todo el estímulo, la cual se va acumulando y sumando hasta que se toma una decisión.

Esperamos que los mecanismos subyacentes a la toma de decisiones perceptuales para identificar estímulos regulares e irregulares sean los mismos en todos los individuos. Así como verificar la precisión del modelo para corroborar que los individuos están utilizando un mecanismo de acumulación de evidencia para tomar decisiones acerca de la irregularidad de un estímulo.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

En este trabajo se pretende determinar los mecanismos de toma de decisiones al momento de distinguir entre estructuras temporales Regulares o Irregulares en una tarea de discriminación de ritmos en humanos (*Homo sapiens*).

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para determinar el mecanismo que interviene en la toma de decisiones frente a estímulos regulares e irregulares se planteó:

1. Construir y programar un modelo matemático capaz de predecir lo que los sujetos contestaron en la tarea de discriminación de ritmos respecto a la irregularidad de un tren de pulsos y en cuánto tiempo lo hicieron.
2. Evaluar si hay conductas similares entre los individuos en función de las respuestas y el tiempo de respuesta (curvas psicométricas y cronométricas de los sujetos).
3. Analizar el ajuste del modelo de toma de decisiones irregulares o regulares en ensayos únicos de la tarea de discriminación de ritmos para detectar las reglas de operación de los sujetos.

5. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

5.1 TAREA DE DETECCIÓN DE IRREGULARIDADES EN HUMANOS

Los datos utilizados para caracterizar la conducta de detección de irregularidades en humanos se tomaron de la base de datos obtenida para el estudio “La percepción de irregularidades temporales en humanos ¿Decidimos por detección o acumulación de evidencia?” (Espinoza & de Lafuente, 2021).

Para este estudio de percepción de irregularidad, se recabaron datos de 15 estudiantes (6 mujeres y 9 hombres) del Instituto de Neurobiología de la UNAM, de entre 22 y 32 años ($M=26$; $D.E. =3.4$), a los cuáles se les pidió observar una secuencia de pulsos de corta duración (estímulo) y decidir tan pronto pudieran, si eran regulares o irregulares. El estímulo Regular se estableció cuando la repetición de los pulsos ocurría a intervalos con la misma duración; mientras que aquellos estímulos que presentaban pulsos a intervalos variables fueron los Irregulares. En todos los casos la duración de los pulsos fue de 50 ms.

La tarea y el procesamiento de datos fueron programados con el paquete de funciones Psychtoolbox-3 (versión 3.0.13) de MATLAB (R2015a) y se usó una computadora con puertos de salida configurados para emitir señales auditivas, táctiles y visuales a través de audífonos, un estimulador táctil y un monitor para ejecutarla.

Para la modalidad auditiva de la tarea, se reprodujeron dos señales simultáneas; por un lado, una pista con ruido browniano (compuesto principalmente por frecuencias graves y medias) que fue constante durante toda la sesión, y la otra consistió en los estímulos presentados en secuencias de pulsos (programados en computadora; generados con una onda sinusoidal de 500 Hz con duración de 50ms). Los estímulos visuales fueron pulsos mostrados como un círculo en el centro de la pantalla con fondo color gris; para evitar efectos post-imagen se colocó un pequeño punto (de 30 X 30 pixeles) en el centro del círculo el cual era el punto de fijación. Para la modalidad táctil se construyó un estimulador que generaba vibraciones (reproducidas y amplificadas a partir de una señal de audio de 1000 Hz

con duración de 50 ms y que era auditivamente imperceptible) que podían ser detectadas por la yema del dedo la cual debía mantenerse sobre el aparato durante toda la sesión.

Todos los estímulos de las tres modalidades consistieron en una secuencia de 20 pulsos, con 20 intervalos intercalados entre sí, a pesar de que la duración de los pulsos era siempre la misma (50 ms), la duración de los intervalos podía variar y esto era lo que generaba la Regularidad ($\%Irr = 0$) y la Irregularidad dada por el porcentaje de Irregularidad de los estímulos ($\%Irr$ podía ser 1.7, 3.3, 6.7, 13.3 o 26.7).

El objetivo principal de los participantes durante la tarea consistía en percibir un estímulo (que podía ser auditivo, visual o táctil) y decidir lo más pronto posible si los pulsos que se les estaban presentando eran regulares (Figura 2a) o irregulares (Figura 2b). En cada ensayo se registró la respuesta del participante, así como el tiempo que tardó en responder; al final de cada estímulo recibían un mensaje de retroalimentación que indicaba si la respuesta generada había sido correcta o incorrecta junto con su tiempo de respuesta (Figura 3).

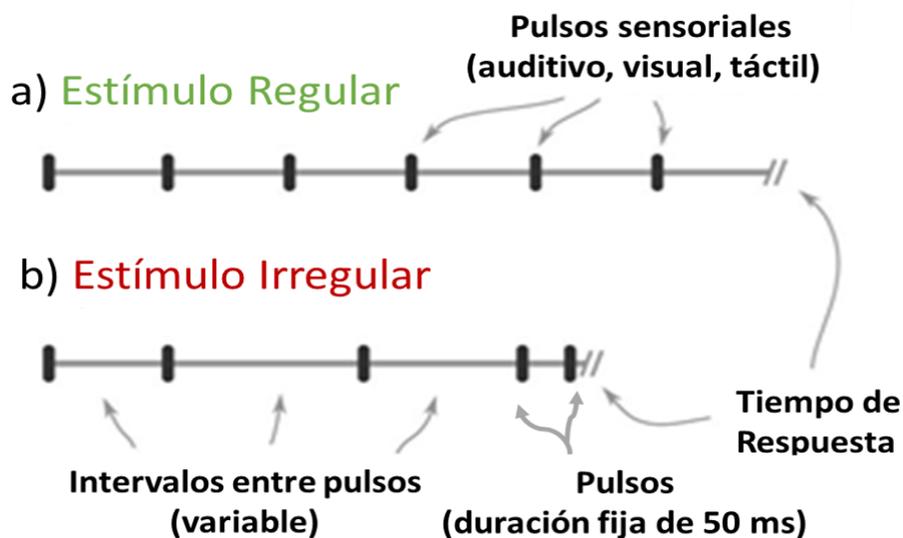


Figura 2. Estructura de los estímulos formados por pulsos (a) Regulares o (b) Irregulares presentados durante la tarea en las tres modalidades sensoriales (auditiva, visual o táctil).

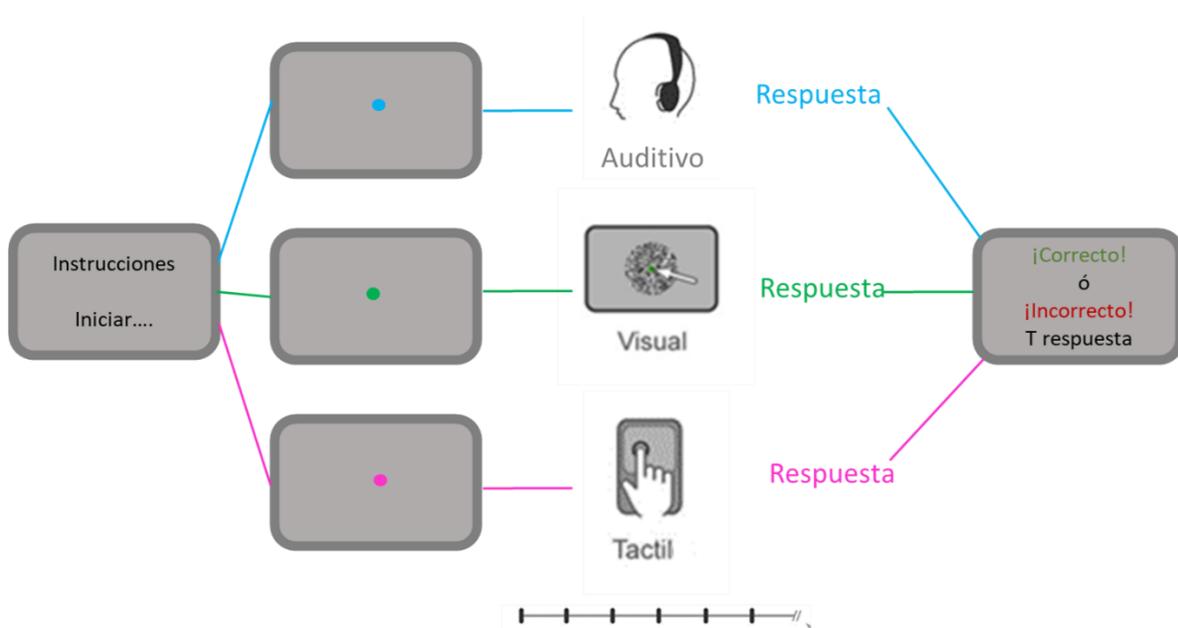


Figura 3. Secuencia de eventos en un ensayo. Al inicio se presentaban las instrucciones y el ensayo empezaba en el momento en que el participante presionaba la barra de espacio. Después de presentarse el punto de fijación con el color correspondiente para la modalidad sensorial, se presentaba el estímulo (secuencia de pulsos) que finalizaba cuando se respondía. Antes de repetir el proceso completo para el siguiente ensayo se mostraba el mensaje de retroalimentación. Una sesión completa consistía en repetir lo anterior 90 veces alternando Modalidad Sensorial, porcentaje de irregularidad y Duración Media.

Cada uno de los 15 participantes completaron tres sesiones al día de entre 15 y 20 minutos, realizando un total de entre 15 y 18 sesiones por persona; cada sesión se compuso de 90 ensayos con una distribución equitativa de los factores de Modalidad Sensorial (visual, auditiva y táctil) y Duración Media (300 ms, 600 ms y 1200 ms) respecto a los porcentajes de irregularidad (0% =Regular, 1.7%, 3.3%, 6.7%, 13.3% y 26.7%), de tal manera que en una sesión se presentaron 30 ensayos de cada Modalidad Sensorial y 30 de cada Duración Media de los intervalos entre pulsos (Figura 4). Entre todos los participantes y todas las sesiones se llevaron a cabo 22,140 ensayos en total.

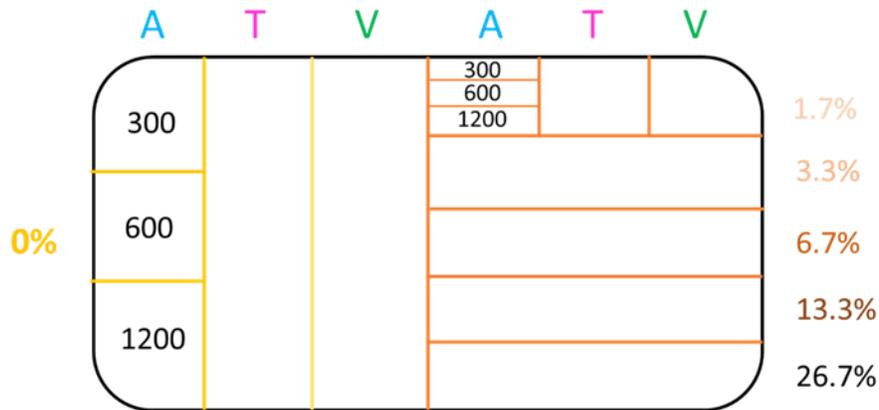


Figura 4. Distribución de los niveles de comparación de los factores incluidos en el conjunto de 90 ensayos por sesión experimental. Separación de la mitad de los ensayos Regulares (0%) e Irregulares en sus diferentes porcentajes de Irregularidad. Ambas divisiones anidadas por niveles de Modalidad Sensorial (Auditiva, Táctil y Visual) y por Duración Media (300, 600 y 1200).

5.2 ANÁLISIS DE DATOS Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Los resultados se analizaron por ensayos únicos, lo que quiere decir que se analizó por separado cada uno de los ensayos realizados por cada sujeto; cada vez que se le presentaba un estímulo al participante y este tomaba una decisión se consideró como un ensayo. También se trataron los datos de cada uno de los participantes para obtener los datos psicométricos y cronométricos de cada uno y no como un promedio, lo que permitió ver con más claridad cuáles son las tendencias individuales y si es que existen patrones repetidos en lo que respecta a la toma de decisiones de estímulos con ritmicidad. Se evaluó el porcentaje de irregularidades en función de las irregularidades totales y del tiempo de respuesta en segundos. Todo lo anterior se analizó para la ejecución por Modalidad Sensorial (táctil, auditiva y visual) y para la ejecución por Duración Media.

También, se analizó cómo es que cada participante utilizó la información de los estímulos para escoger una respuesta y el momento en el que decidió responder durante la tarea de percepción de estímulos, mediante la construcción de un modelo computacional.

El modelo fue programado en MATLAB (R2020b) y funciona con la evidencia que se calcula al comparar la duración de los intervalos que forman parte del estímulo. Para ilustrar lo anterior se muestra una gráfica que represente en el eje de las abscisas las unidades relativas de intervalos completos observados y en el eje de las ordenadas las unidades relativas de evidencia calculadas a partir de la siguiente fórmula: $|t_i - t_{i-1}| / t_{i-1}$. Los valores positivos en el eje de las ordenadas tienden a la opción de respuesta “Irregular”, y los valores negativos del mismo eje tienden a la opción de respuesta “Regular”. Se supone que la ubicación de los umbrales es simétrica alrededor de cero y que está determinada por el valor de UD; el umbral tiene símbolo positivo para el umbral Irregular y negativo para el umbral Regular. La respuesta se genera una vez que alguno de los dos umbrales es alcanzado y sobrepasado (Figura 5). Este modelo se aplicó y ajustó a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de cada uno de los participantes de manera individual.

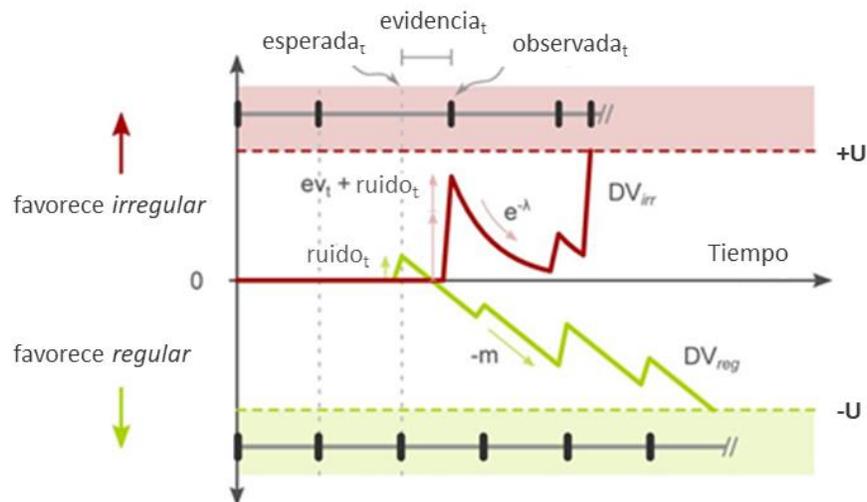


Figura 5. Modelo de toma de decisión (Espinoza-Monroy & de Lafuente, 2021).

En el modelo la decisión (regular o irregular) está determinada por el primer proceso que alcanza su límite de decisión (umbral) por lo que se espera que se tome una decisión irregular cuando la variable de decisión irregular (DV_{irr}) alcance el umbral superior que corresponde a la respuesta irregular. Si por el contrario es la variable de decisión regular (DV_{reg}) la que alcanza primero el umbral inferior que estará en

función del tiempo transcurrido, la respuesta será regular. De tal forma que la evidencia de un tren de pulsos irregulares llevará rápidamente a DV_{irr} hacia el umbral superior resultando en una respuesta irregular y, por el contrario, un tren de pulsos regulares al no generar evidencia suficiente para que DV_{irr} se mueva, llevará a DV_{reg} hacia el umbral inferior resultando en una respuesta regular.

Uno de los supuestos del modelo es que mientras se va presentando el estímulo, los participantes realizan un registro secuencial de la duración de los intervalos (evidencia); el otro supuesto es que, al completarse la duración de cada intervalo, nuestro cerebro hace una comparación absoluta y relativa entre el intervalo recién terminado y el intervalo inmediatamente anterior; este proceso debe ser repetido hasta que termine o hasta que el participante responda.

La evidencia se refiere a un registro secuencial de la duración de los intervalos y se calcula como la diferencia entre la duración del intervalo actual (t_i) menos la duración del intervalo anterior (t_{i-1}) dividido entre la duración del intervalo anterior:

$$\text{Evidencia} = \frac{|t_i - t_{i-1}|}{t_{i-1}}$$

La evidencia generada por cada intervalo nuevo se va sumando con las evidencias anteriores junto con ruido y va generando a DV_{irr} de la siguiente manera:

$$DV_{irr}(t) = DV_{irr}(t-1) * e^{-\lambda t_i} + \text{evidencia} + |N(0, \sigma_s)|$$

Donde $|N(0, \sigma_s)|$ es ruido positivo parametrizado por σ_s ; t_i es la duración del nuevo intervalo y λ es la constante de decaimiento de la evidencia acumulada. DV_{reg} presenta un parámetro más m que es la pendiente y DV_{reg} es generada de la siguiente manera:

$$DV_{reg}(t) = DV_{reg}(t-1) - m * t_i + |N(0, \sigma_s)|$$

Una vez construido y programado el modelo, lo corrimos con los valores reales de intervalos que se les presentaron a cada uno de los participantes en cada uno de los ensayos. Una vez que obtuvimos la predicción del modelo para cada uno de los ensayos de cada individuo, los resultados se compararon con los datos de la tarea de conducta. Para obtener el mejor ajuste posible entre ambos resultados, usamos el algoritmo de optimización patternsearch de MATLAB con el cual obtuvimos el mejor ajuste modelo-conducta, así como los valores óptimos de los cuatro parámetros involucrados en la construcción del modelo (umbrales, σ ruido, m , λ). Se construyeron las curvas psicométricas y cronométricas de lo que el modelo contra lo que el sujeto contestó y para comprobar la precisión del modelo se obtuvo el coeficiente de determinación R^2 y el porcentaje de respuestas explicadas por el modelo.

6. RESULTADOS

6.1 EFECTO DE LOS PARÁMETROS SOBRE EL MODELO

Para identificar las reglas de operación que pueden estar determinando la elección de respuesta entre Regular o Irregular y el tiempo de respuesta en el que esto ocurre ensayo por ensayo, elaboramos un modelo computacional que utilizando la estructura temporal de cada ensayo y los parámetros m , λ , umbral y σ ruido (se definen más adelante), nos permite simular la decisión perceptual de cada uno de los ensayos de todos los participantes. A continuación, explicaremos cómo es que cada uno de los cuatro parámetros afectan al modelo y cómo es que valores muy grandes o pequeños de cada uno modifican la respuesta del modelo, así como las curvas cronométricas y psicométricas del mismo.

VALOR DEL UMBRAL (UD)

Los umbrales representan la altura límite de la decisión; es decir, el valor que DV_{irr} o en su defecto DV_{reg} deben alcanzar para que se tomé la decisión de si el estímulo percibido fue Regular o Irregular. La ubicación de los umbrales es simétrica alrededor de cero y tiene signo negativo para el umbral Regular y signo positivo para el umbral Irregular.

El valor del umbral va a afectar principalmente el tiempo de reacción el cuál será mucho más largo para valores de umbral muy grandes (Figuras 6 y 7b) y más corto para valores de umbral más pequeños (Figuras 6 y 7f) en donde la decisión se tomará mucho más rápido. Cuando los umbrales son muy grandes y una vez que terminan todos los intervalos de un ensayo ninguna de las variables de decisión alcanzó un umbral, el modelo se programó para seleccionar de manera aleatoria la DV ganadora y toma como tiempo de reacción la suma de todos los intervalos presentados en ese ensayo.

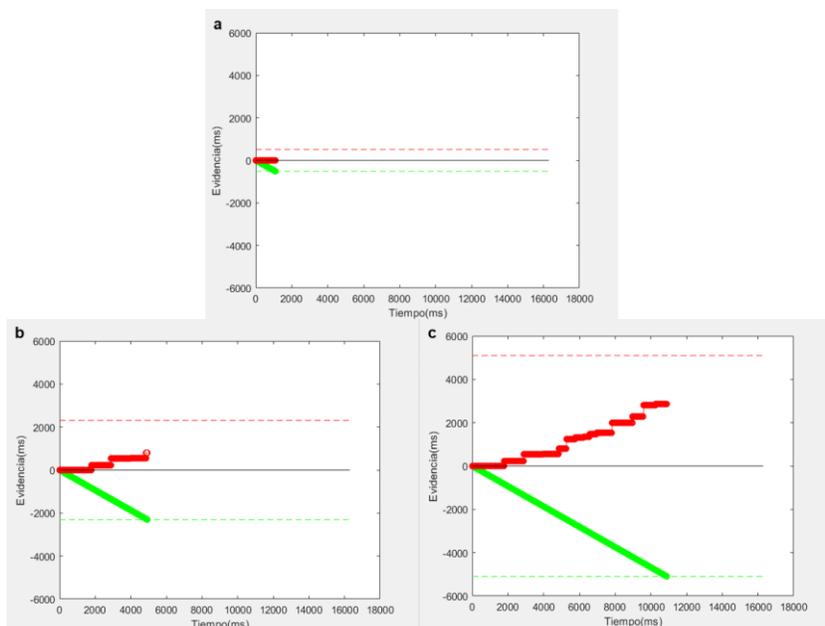


Figura 6. Operación del modelo de decisión. La línea roja representa el umbral Irregular que es positivo y la línea verde punteada representa el umbral Regular que es negativo y simétrico al Irregular. La línea roja representa a DVirr con ruido incluido y la línea roja representa a DVreg. Las figuras representan una secuencia de evidencias de un estímulo en donde DVreg llega primero, representando lo que sucede con la evidencia y el tiempo de respuesta cuando el umbral tiene un valor muy pequeño de 510 (a), un valor intermedio de 2,305 (b) y un valor grande de 5100 (c). En donde se observa cómo el tiempo que el modelo se tarda en alcanzar una respuesta es mayor para umbrales más grandes.

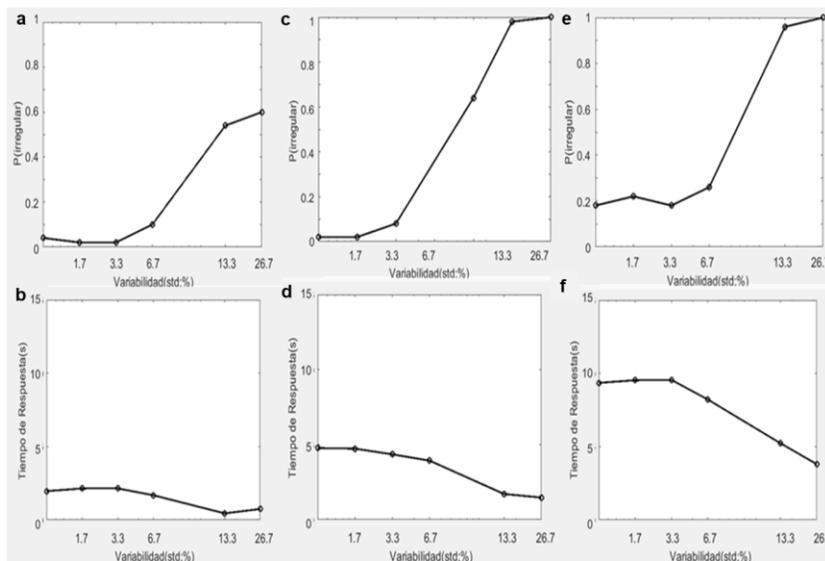


Figura 7. Curvas psicométricas en la fila superior y cronométricas en la fila inferior del modelo cuando el valor de umbral es pequeño (510) en la primera columna (figuras a y b), cuando el parámetro de umbral es un valor intermedio (2,305) en la segunda columna (figuras c y d) y cuando el valor del umbral es grande (5,100) en la tercera columna (figuras e y f). Las curvas psicométricas representan el porcentaje de respuestas irregulares para cada porcentaje de variación intervalar (0, 1.7, 3.3, 6.7, 13.3 y 26.7%) en donde 0 representa la regularidad y los valores más grandes un mayor porcentaje de Irregularidad en el estímulo y las cronométricas representan el tiempo de respuesta en segundos para cada porcentaje de variación intervalar.

PENDIENTE (m)

El parámetro m determina la pendiente de la caída lineal de la variable de decisión la cuál siempre será un valor negativo y por lo tanto va a llevar la respuesta hacia el umbral negativo que representa la decisión Regular. Cuando tenemos una pendiente muy pequeña aumenta la probabilidad de generar una respuesta Irregular (Figura 8a) por lo que el porcentaje de irregularidades va a ser muy alto sin importar el valor de la variación de intervalo presentada (Figura 9a) a pesar de que la curva cronométrica para variaciones distintas de cero si conserva la tendencia en la que al aumentar el porcentaje de variación va disminuyendo el tiempo de reacción (Figura 9b).

Cuando por el contrario el valor de la pendiente es grande (Figura 8c), este parámetro moverá muy rápido a la variable de decisión hacia el umbral negativo que representa la respuesta Regular, por lo que el porcentaje de irregularidades será cero excepto para las variaciones grandes que aun así no logran llegar al cien por ciento (Figura 9e) como sucedería con valores intermedios de la pendiente (Figura 9c). Con valores grandes de m el tiempo de respuesta también disminuye ya que este parámetro hace que sea muy fácil tomar rápidamente la decisión regular (Figura 9f).

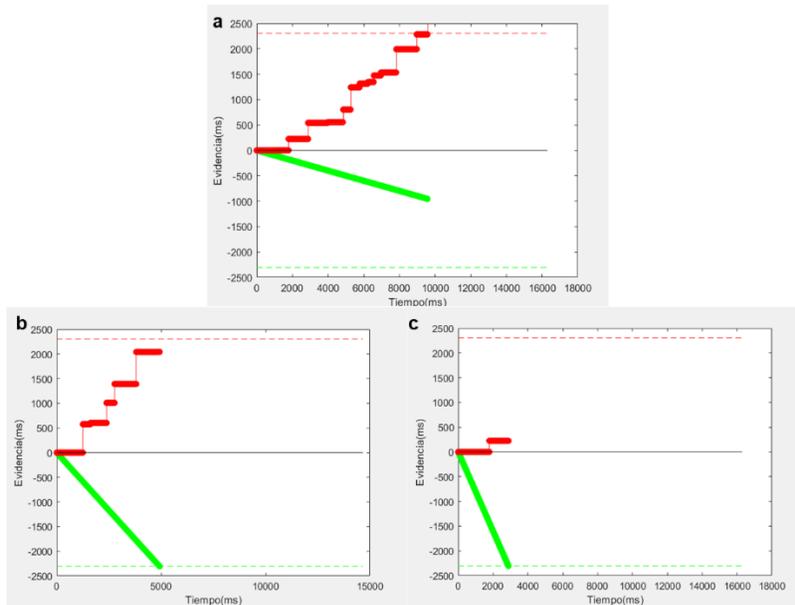


Figura 8. Operación del modelo de decisión. La línea roja punteada representa el umbral Irregular que es positivo y la línea verde punteada representa el umbral Regular que es negativo y simétrico al Irregular. La línea roja representa a DV_{irr} con ruido incluido y la línea roja representa a DV_{reg} . Las figuras representan una secuencia de evidencias de un estímulo en donde se observa lo que sucede con la evidencia y el tiempo de respuesta cuando el valor del parámetro m es muy pequeño (-0.1) permitiendo que DV_{irr} alcance primero su umbral (a); cuando por el contrario m tiene un valor intermedio de -0.468 (b) o un valor grande de -1 (c) la pendiente acerca más rápidamente a DV_{reg} hacia su umbral.

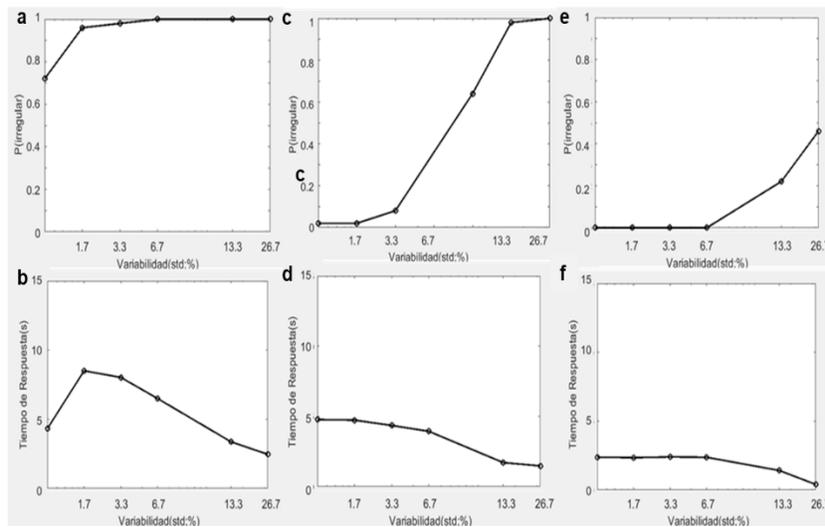


Figura 9. Curvas psicométricas en la fila superior y cronométricas en la fila inferior del modelo cuando el valor de la pendiente m es pequeño (-0.1) en la primera columna (figuras a y b), cuando el parámetro m es un valor intermedio (-0.468) en la segunda columna (figuras c y d) y cuando el valor de m es grande (-1) en la tercera columna (figuras e y f). Las curvas psicométricas representan el porcentaje de respuestas irregulares para cada porcentaje de variación intervalar (0, 1.7, 3.3, 6.7, 13.3 y 26.7%) en donde 0 representa la regularidad y los valores más grandes un mayor porcentaje de Irregularidad en el estímulo y las cronométricas representan el tiempo de respuesta en segundos para cada porcentaje de variación intervalar.

RUIDO (RS)

El valor del ruido sensorial corresponde al valor absoluto de una muestra aleatoria tomada de una distribución normal con media cero y desviación estándar igual al parámetro RS. Este ruido se suma con el valor de la evidencia, cuando el valor de la evidencia es cero $e=0$, se da un incremento idéntico en las variables Irregular y en la Regular. El ruido se interpreta como cualquier agente externo que pueda considerarse un distractor; se refiere a todos los factores que no conocemos del todo pero que pueden estar generando que nuestra percepción no sea fiel al estímulo físico y en el modelo siempre es un valor positivo porque asumimos que el ruido en cualquier nivel en el SN debe contribuir a la percepción de irregularidades. Como siempre es un valor positivo, es lo que genera que en la gráfica del modelo las DV se muevan como en escalones y no sean rectas moviéndose hacia los umbrales.

El ruido al ser un valor positivo va a llevar a DV hacia el umbral positivo que representa la respuesta Irregular, esto ocasiona que cuando tengamos valores de RS pequeños, la interferencia del ruido sean mínima y no intervenga tanto (Figura 10a), por lo que la curva psicométrica se mantienen de acuerdo a lo esperado con una forma sigmoideal en donde conforme aumenta el porcentaje de variación intervalar, también aumenta el porcentaje de respuestas irregulares (Figura 11a) y lo mismo sucede con la cronométrica en donde a medida que la variación aumenta el tiempo de respuesta disminuye (Figura 11b). Sin embargo, valores de RS muy grandes van a provocar que DVirr llegue mucho más rápido al umbral Irregular y DVreg sea jalado hacia lo positivo en lugar de bajar hacia el umbral Regular (Figura 10c). Lo anterior ocasiona que la cantidad de respuestas irregulares esperadas sea muy alta (Figura 11c) y que las decisiones irregulares sean tomadas en muy poco tiempo (Figura 11d). Si el valor de ruido es excesivo, todas las respuestas son prácticamente irregulares sin importar la variación intervalar (Figura 11e) y el tiempo de respuesta es muy bajo y más rápido para variaciones grandes (Figura 11f).

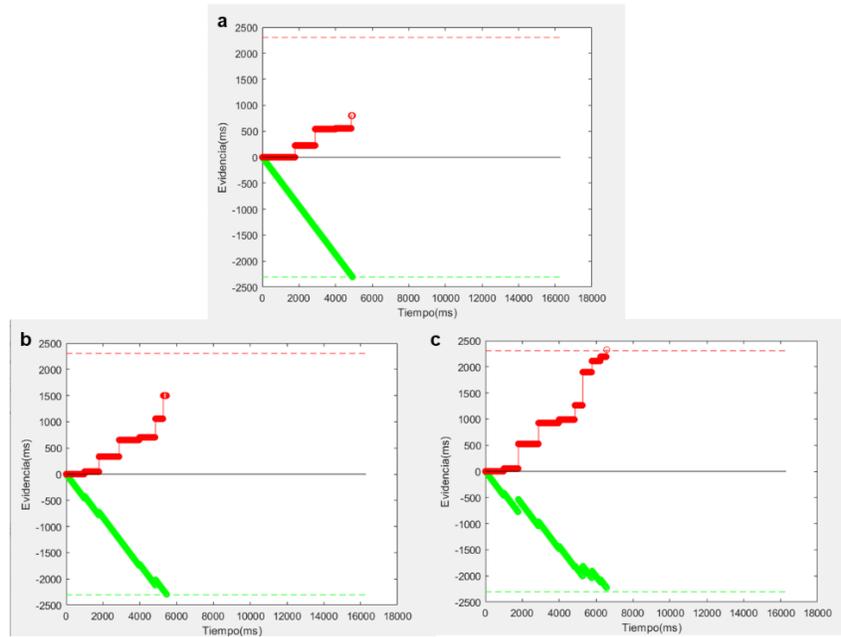


Figura 10. Operación del modelo de decisión. La línea roja representa el umbral Irregular que es positivo y la línea verde punteada representa el umbral Regular que es negativo y simétrico al Irregular. La línea roja representa a DVirr con ruido incluido y la línea roja representa a DVreg. Las figuras representan una secuencia de evidencias de un estímulo en donde se observa lo que sucede con la evidencia y el tiempo de respuesta cuando el valor del parámetro ruido (RS) es muy pequeño con un valor de 0.231 (a); cuando por el contrario RS tiene un valor intermedio de 70 (b) o un valor grande de 120 (c) donde el ruido al ser siempre positivo acerca a DVreg y a DVirr hacia el umbral positivo que representa la respuesta Irregular.

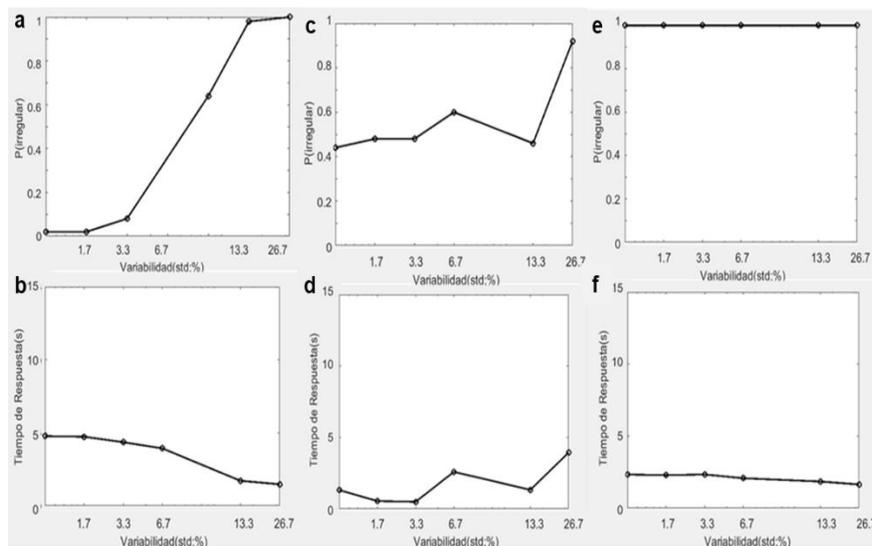


Figura 11. Las curvas psicométricas representan el porcentaje de respuestas irregulares para cada porcentaje de variación intervalar (0,1.7,3.3,6.7,13.3 y 26.7%) en donde 0 representa la regularidad y los valores más grandes un mayor porcentaje de Irregularidad en el estímulo y las cronométricas representan el tiempo de respuesta en segundos para cada porcentaje de variación intervalar. Curvas psicométricas en la fila superior y cronométricas en la fila inferior del modelo cuando el valor de ruido RS es pequeño (0.231) en la primera columna (figuras a y b), cuando el parámetro RS es un valor grande (70) en la segunda columna (figuras c y d) y cuando el valor de RS es excesivo (120) en la tercera columna (figuras e y f).

LAMBDA (λ)

Para la variable de decisión Irregular el parámetro lambda (λ) representa la constante de caída exponencial u olvido de la evidencia de irregularidad. Este parámetro es el que define si el modelo es de “Acumulación” cuando $\lambda = 0$ o de “Detección” cuando el valor de lambda es grande. Un valor muy grande de lambda provoca que después de cada intervalo, si el modelo no alcanzó el umbral Irregular la variable de decisión regresa a cero (Figura 12c), impidiendo que se acumule evidencia y como consecuencia de esto sólo un valor de evidencia que sobrepase el umbral Irregular podría generar que ganara la respuesta de Irregularidad; esto complica que se tome una decisión irregular y excepto para variabilidades de intervalos grandes, las probabilidades de responder irregular son prácticamente cero (Figura 13e).

Cuando el valor de lambda es cero, al término de cada intervalo el valor de evidencia de los intervalos anteriores se va acumulando en espera de otro incremento con el término del siguiente intervalo y de esta manera va guardando e integrando las entradas a favor de la respuesta Irregular (Figura 12a). Cuando esto sucede la probabilidad de detectar un tren de pulsos como irregular va aumentando de forma sigmoïdal conforme aumenta el porcentaje de variación entre intervalos (Figura 13a). El tiempo de respuesta mantiene el mismo patrón de disminuir en función de la variabilidad y no se ve afectado por el valor de lambda (Figura 13b).

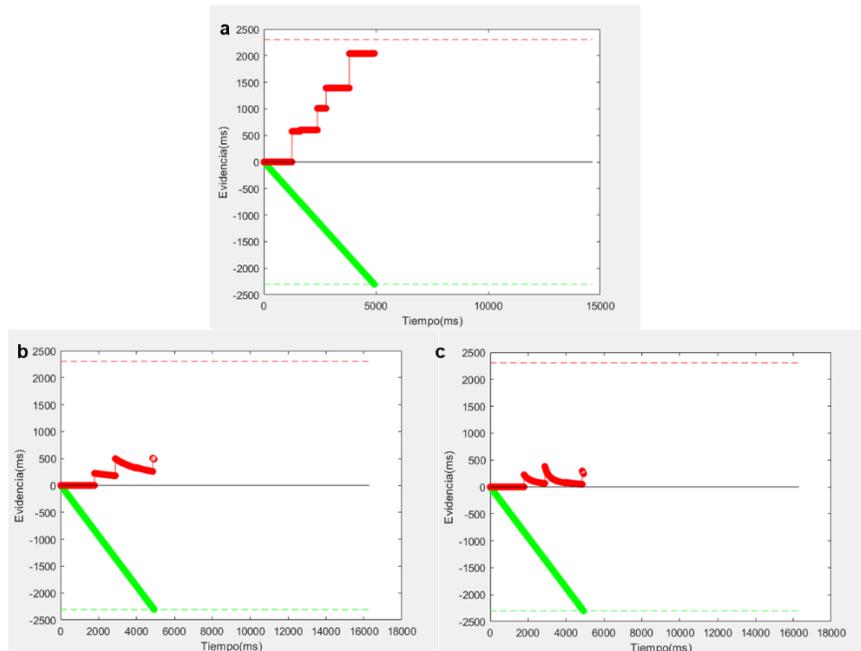


Figura 12. Operación del modelo de decisión. La línea roja representa el umbral Irregular que es positivo y la línea verde punteada representa el umbral Regular que es negativo y simétrico al Irregular. La línea roja representa a DVirr con ruido incluido y la línea roja representa a DVreg. Las figuras representan una secuencia de evidencias de un estímulo en donde se observa lo que sucede con la evidencia y el tiempo de respuesta cuando el valor del parámetro lambda (λ) es cero y no hay olvido de evidencia por lo que la evidencia sigue subiendo como en escalones (a); cuando por el contrario λ tiene un valor pequeño de -0.00001 (b) o un valor grande de -0.1 (c) donde la constante de olvido de la evidencia de irregularidad regresa a cero al final de cada intervalo.

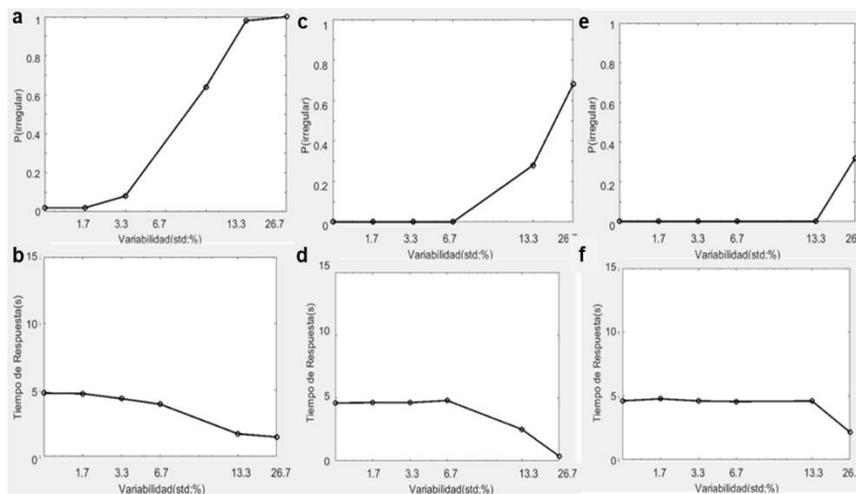


Figura 13. Las curvas psicométricas representan el porcentaje de respuestas irregulares para cada porcentaje de variación intervalar (0, 1.7, 3.3, 6.7, 13.3 y 26.7%) en donde 0 representa la regularidad y los valores más grandes un mayor porcentaje de Irregularidad en el estímulo y las cronométricas representan el tiempo de respuesta en segundos para cada porcentaje de variación intervalar. Curvas psicométricas en la fila superior y cronométricas en la fila inferior del modelo cuando $\lambda = 0$ en la primera columna (figuras a y b), cuando el parámetro λ es un valor intermedio (-0.00001) en la segunda columna (figuras c y d) y cuando el valor de λ es grande (-0.1) en la tercera columna (figuras e y f).

6.2 AJUSTE DEL MODELO

Una vez construido el modelo, utilizamos los valores reales de los intervalos vistos por cada participante en cada uno de los ensayos y mediante el algoritmo de optimización `patternsearch` de MATLAB (R2020b) encontramos los valores de cada uno de los parámetros que mejor ajustan el modelo a lo que cada sujeto contestó (los que reducen mejor el error entre el modelo y los sujetos) ensayo por ensayo. Para probar el modelo de acumulación fijamos el valor de $\lambda = 0$ (Figura 14 A, B) y se le asignó un valor diferente de cero para probar el modelo de detección (Figura 14 C, D). Para determinar la bondad de ajuste de ambos modelos y la proporción de varianza explicada por la regresión, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para cada individuo para cada categoría de duración de intervalo (300, 600 y 1200 ms) y por modalidad sensorial (auditiva, visual y táctil).

Se encontró que el mejor ajuste con los datos conductuales de los participantes se dio con el modelo de acumulación (Figura 14) y que es este modelo el que explica la mayor proporción de varianza (Figura 15) en todos los individuos.

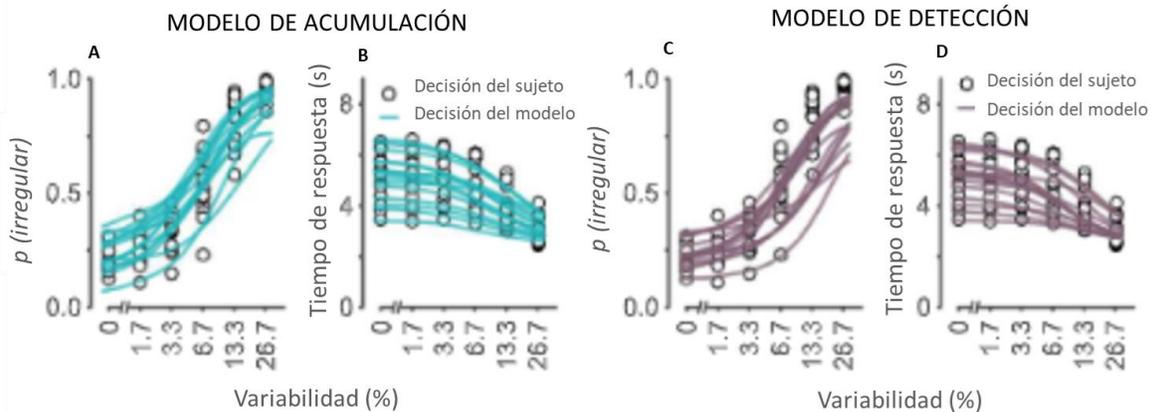


Figura 14. Ajuste del modelo a los datos conductuales cuando la evidencia se va acumulando a lo largo del estímulo (A, B) y cuando hay olvido de evidencia entre cada intervalo que se presenta a lo largo del estímulo (C, D). Los círculos representan las respuestas de los sujetos y las líneas el ajuste del modelo para cada uno de los participantes; se presentan los datos de respuestas irregulares (curvas psicométricas) y de tiempo de reacción (curvas cronométricas) para los dos modelos que se pusieron a prueba. En todos los individuos se observó un mejor ajuste con el modelo de acumulación (Espinoza-Monroy & de Lafuente, 2021).

El promedio de los coeficientes de determinación arrojados por el modelo de acumulación fue de 0.69 ± 0.1321 mientras que el arrojado por el modelo de detección fue de 0.28 ± 0.2354 . Con el modelo de acumulación se observó que los valores de R^2 son mucho más cercanos a 1 (Figura 15) y al realizar una prueba t pareada se confirmó que la diferencia entre los datos de ajuste obtenidos entre ambos modelos es significativa ($p < 0.05$). El modelo de acumulación es mejor predictor de los datos conductuales que el modelo de detección y esto se observa también en los análisis por ensayo.

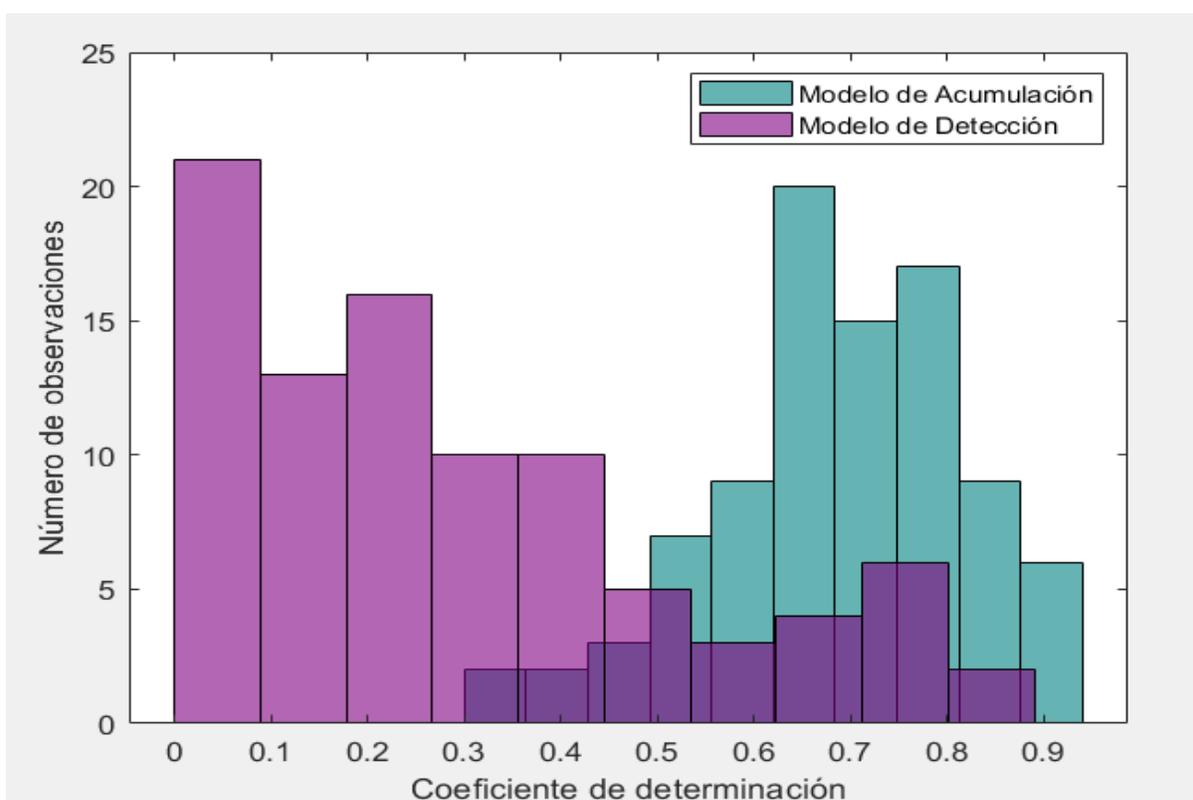


Figura 15. Histogramas de los valores de R^2 obtenidos al ajustar los datos conductuales con el modelo de detección (en color morado) y con el de acumulación (en color aqua). Se tomaron los coeficientes de determinación de los 15 participantes para cada una de las condiciones de duración de intervalo y de modalidad sensorial; de tal manera que se obtuvieron seis valores de R^2 por cada individuo. Se observa claramente que con el modelo de detección los datos se concentran a la izquierda (más cerca del 0) y con el modelo de acumulación están más concentrados hacia la derecha del gráfico (más cerca del 1).

Utilizando los mismos valores de cada intervalo observado por los participantes durante la prueba conductual, se obtuvieron los valores óptimos (Figura 16) para los parámetros de umbral, ruido y pendiente de cada sujeto.

Al comparar los valores óptimos de los parámetros de los individuos, encontramos que, si bien existe variabilidad, también se observan las mismas tendencias entre individuos. La duración de los intervalos es un factor que modifica los parámetros de la pendiente y de umbral en todos los individuos; el valor de los umbrales disminuyó a medida que aumentó la duración del intervalo (Figura 16 A) y lo mismo sucedió con los valores de la pendiente (Figura 16 C). En el caso del ruido la variabilidad de los valores es mayor en los intervalos más largos y el valor de ruido es prácticamente igual en todos los individuos cuando los intervalos son más cortos (Figura 16 B). La modalidad sensorial no afecta a los valores de los parámetros, los cuales fueron similares sin importar si los ensayos fueron auditivos, visuales o táctiles (Figura 16 D-F).

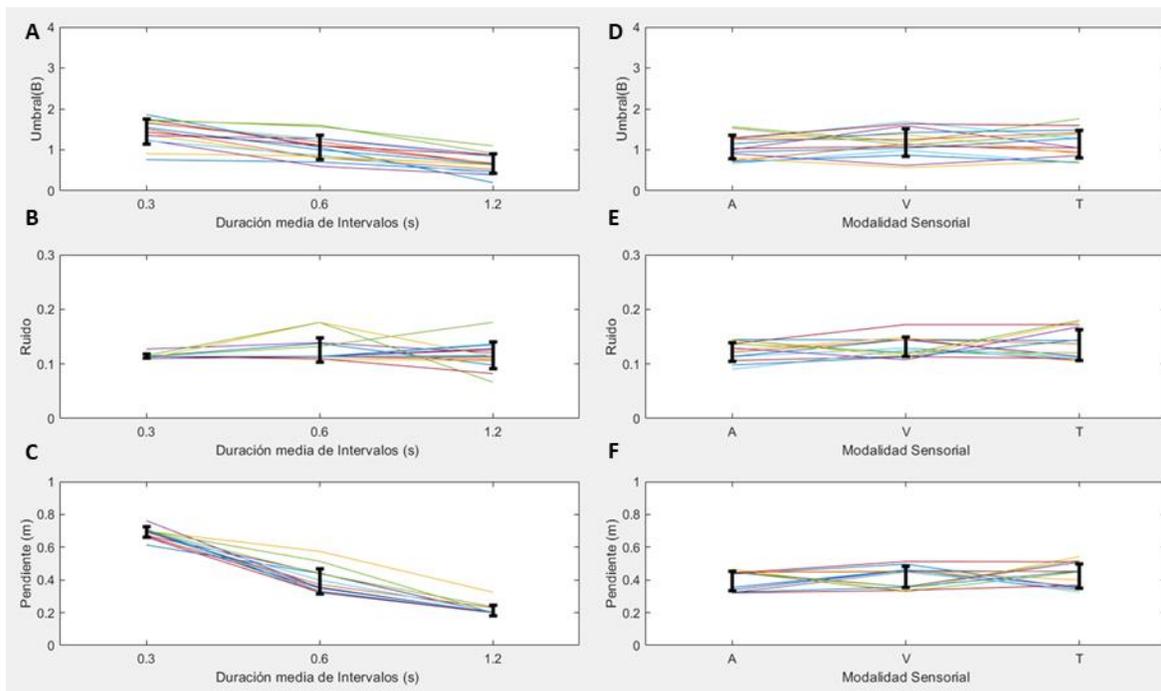


Figura 16. Variabilidad entre los parámetros óptimos de los individuos con error estándar arrojados por el modelo de acumulación. El panel del lado izquierdo muestra lo que pasa con los valores en función de la duración de intervalo (0.3, 0.6 y 1.2 s) y el panel del lado derecho muestra lo que sucede en función de la modalidad sensorial (auditiva, visual y táctil).

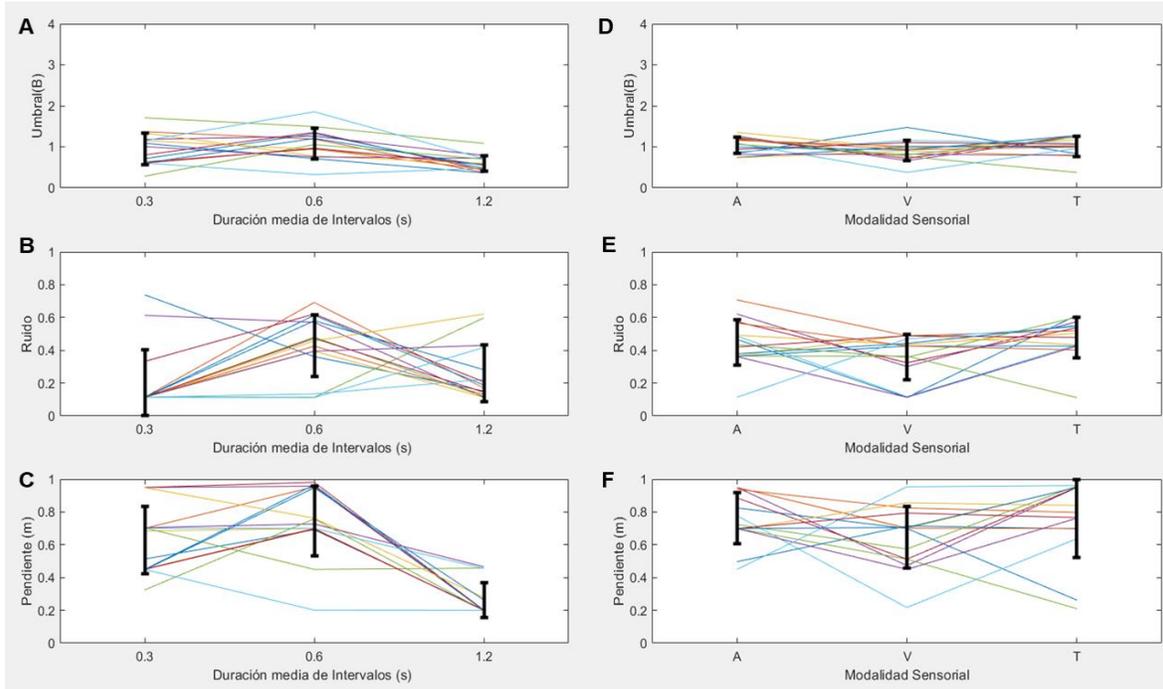


Figura 17. Variabilidad entre los parámetros óptimos de los individuos con error estándar arrojados por el modelo de detección. El panel del lado izquierdo muestra lo que pasa con los valores en función de la duración de intervalo (0.3, 0.6 y 1.2 s) y el panel del lado derecho muestra lo que sucede en función de la modalidad sensorial (auditiva, visual y táctil).

En contraste con lo anterior, al evaluar lo que sucede con la pendiente, el umbral y el ruido entre sujetos con el modelo de detección, no se observa ningún tipo de tendencia para ninguno de los parámetros sin importar la duración media de los intervalos (Figura 17 A-C) ni la modalidad sensorial (Figura 17 D-F). En todos los casos, los errores estándar son mucho mayores que los arrojados por el modelo de acumulación y la desviación estándar también es mayor para el modelo de detección en la mayoría de los parámetros (Tabla 1).

PARÁMETROS	MODELO DE DETECCIÓN		MODELO DE ACUMULACIÓN	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
UD	0.9272 ± 0.0977	0.3178	1.0905 ± 0.1149	0.3778
RS	0.3625 ± 0.0382	0.1876	0.1238 ± 0.0131	0.0214
m	0.6340 ± 0.0668	0.2552	0.4220 ± 0.0445	0.1525
Por Duración de Intervalo (DI)				
UD DI 300 ms	0.9488 ± 0.2450	0.3819	1.4466 ± 0.3735	0.3147
RS 300 ms	0.2037 ± 0.0526	0.2012	0.1140 ± 0.0294	0.0040
m 300 ms	0.6286 ± 0.1623	0.2069	0.6915 ± 0.1785	0.0313
UD DI 600 ms	1.0765 ± 0.2780	0.3705	1.0530 ± 0.2719	0.2961
RS DI 600 ms	0.4282 ± 0.1106	0.1857	0.1258 ± 0.0325	0.0226
m DI 600 ms	0.7460 ± 0.1926	0.2120	0.3908 ± 0.1009	0.0770
UD DI 1200 ms	0.5919 ± 0.1528	0.1884	0.6558 ± 0.1693	0.2357
RS DI 1200 ms	0.2604 ± 0.0672	0.1735	0.1157 ± 0.0299	0.0251
m DI 1200 ms	0.2614 ± 0.0675	0.1053	0.2130 ± 0.0550	0.0330
Por Modalidad Sensorial (MS)				
UD MS Auditiva	1.0315 ± 0.2663	0.1997	1.0752 ± 0.2776	0.2876
RS MS Auditiva	0.4481 ± 0.1157	0.1406	0.1221 ± 0.0315	0.0172
m MS Auditiva	0.7623 ± 0.1968	0.1573	0.3948 ± 0.1019	0.0600
UD MS Visual	0.9068 ± 0.2341	0.2474	1.1723 ± 0.3027	0.3371
RS MS Visual	0.3571 ± 0.0922	0.1385	0.1313 ± 0.0339	0.0180
m MS Visual	0.6459 ± 0.1668	0.1895	0.4172 ± 0.1077	0.0640
UD MS Táctil	1.0075 ± 0.2601	0.2419	1.1397 ± 0.2943	0.3446
RS MS Táctil	0.4772 ± 0.1232	0.1219	0.1341 ± 0.0346	0.0281
m MS Táctil	0.7597 ± 0.1961	0.2398	0.4245 ± 0.1096	0.0749

Tabla 1. Valores promedio arrojados por ambos modelos para todos los parámetros (UD, m, RS) generales, por duración de intervalo y por modalidad sensorial con sus respectivos errores y con sus respectivos valores de desviación estándar.

Generamos las curvas psicométricas y cronométricas de cada uno de los sujetos y de lo que el modelo de acumulación predijo (Figura 18 A-F) para cada una de las duraciones promedio de intervalos (300, 600 y 1200). En las curvas psicométricas a pesar de mostrar valores diferentes entre lo que predijo el modelo y lo que los sujetos contestaron, las tendencias y formas de las curvas son muy similares en todos los casos (Figura 18 A, C, E), mientras que en el caso de las cronométricas el ajuste entre el modelo y los datos conductuales fue todavía mejor (Figura 18 B, D, F). Se encontró que, si bien el modelo tiene un buen ajuste a los datos conductuales, su ajuste y capacidad de predicción fue mucho mejor cuando la duración promedio de los intervalos fue de 600 ms ($R^2 = 0.9339$; Figura 18 C, D) en contraste con los ensayos cuya duración fue de 300 ms ($R^2 = 0.6393$; Figura 18 A, B) y de 1200 ms ($R^2 = 0.8404$; Figura 18 E, F). Cuando el análisis de los datos se realizó por modalidad sensorial, el ajuste a pesar de seguir explicando más de la mitad de la varianza no es tan bueno y su ajuste con los ensayos auditivos ($R^2 = 0.8020$; Figura 20 A, B), visuales ($R^2 = 0.9064$; Figura 20 C, D) y táctiles ($R^2 = 0.7607$; Figura 20 E, F) es muy similar.

Cuando comparamos las respuestas de los sujetos y lo predicho por el modelo de detección tanto en las curvas psicométricas (Figura 19 y 21 A, C, E) como en las cronométricas (Figura 19 y 21 B, D, F), encontramos que el ajuste con este modelo fue mucho peor en todos los análisis que el modelo de acumulación. Tanto en la duración de intervalo de 300 ms ($R^2 = 0.0291$; Figura 19 A, B), como en la de 600 ms ($R^2 = 0.0239$; Figura 19 C, D) y 1200 ms ($R^2 = 0.0849$; Figura 19 E, F), el valor de R^2 ni siquiera alcanzó el 0.1. El ajuste del modelo de detección por modalidad sensorial tampoco fue bueno y fue muy similar entre los ensayos auditivos ($R^2 = 0.0185$; Figura 21 A, B), visuales ($R^2 = 0.1972$; Figura 21 C, D) y táctiles ($R^2 = 0.0638$; Figura 21 E, F).

Al comparar tanto las respuestas como el tiempo de respuesta de cada sujeto con lo que predijo el modelo en cada uno de los ensayos representando ambas respuestas en la gráfica de puntos, esperábamos encontrar cúmulos de puntos

únicamente en el cuadrante inferior izquierdo y en el superior derecho obteniendo una línea recta bajo el supuesto de que el modelo tuviera un ajuste perfecto.

Al poner a prueba el modelo de acumulación, encontramos que para todas las duraciones de intervalos (Figura 18 G-I) y para todas las modalidades (Figura 20 G-I), los ensayos están repartidos por todos los cuadrantes y aunque no en todos los casos el modelo fue fiel a lo que el sujeto respondió, existe una tendencia y una mayor cantidad de ensayos en los que el sujeto y el modelo de acumulación coincidieron en respuesta y en tiempo de respuesta; el modelo de acumulación predijo el 67.7% de las respuestas de los sujetos.

Respecto al modelo de detección, su capacidad de predicción es del 47.2%, los ensayos están más dispersos y distribuidos en todos los cuadrantes, no capta ninguna de las tendencias que se observan en los datos conductuales y falla en la predicción de ensayos en los que la respuesta era muy evidente. Por ejemplo, para casi la mitad de los ensayos con el máximo porcentaje de irregularidad predijo una respuesta regular cuando al contrastarlo con los datos de conducta, para los sujetos era muy evidente que se trataba de un estímulo irregular (Figuras 19 y 21 G-I).

Tomando en cuenta todo lo anterior y el porcentaje de respuestas predichas por ambos modelos, podemos decir que el modelo de acumulación tiene mucho mejor ajuste y es un mejor predictor que el modelo de detección para la tarea de percepción de irregularidades.

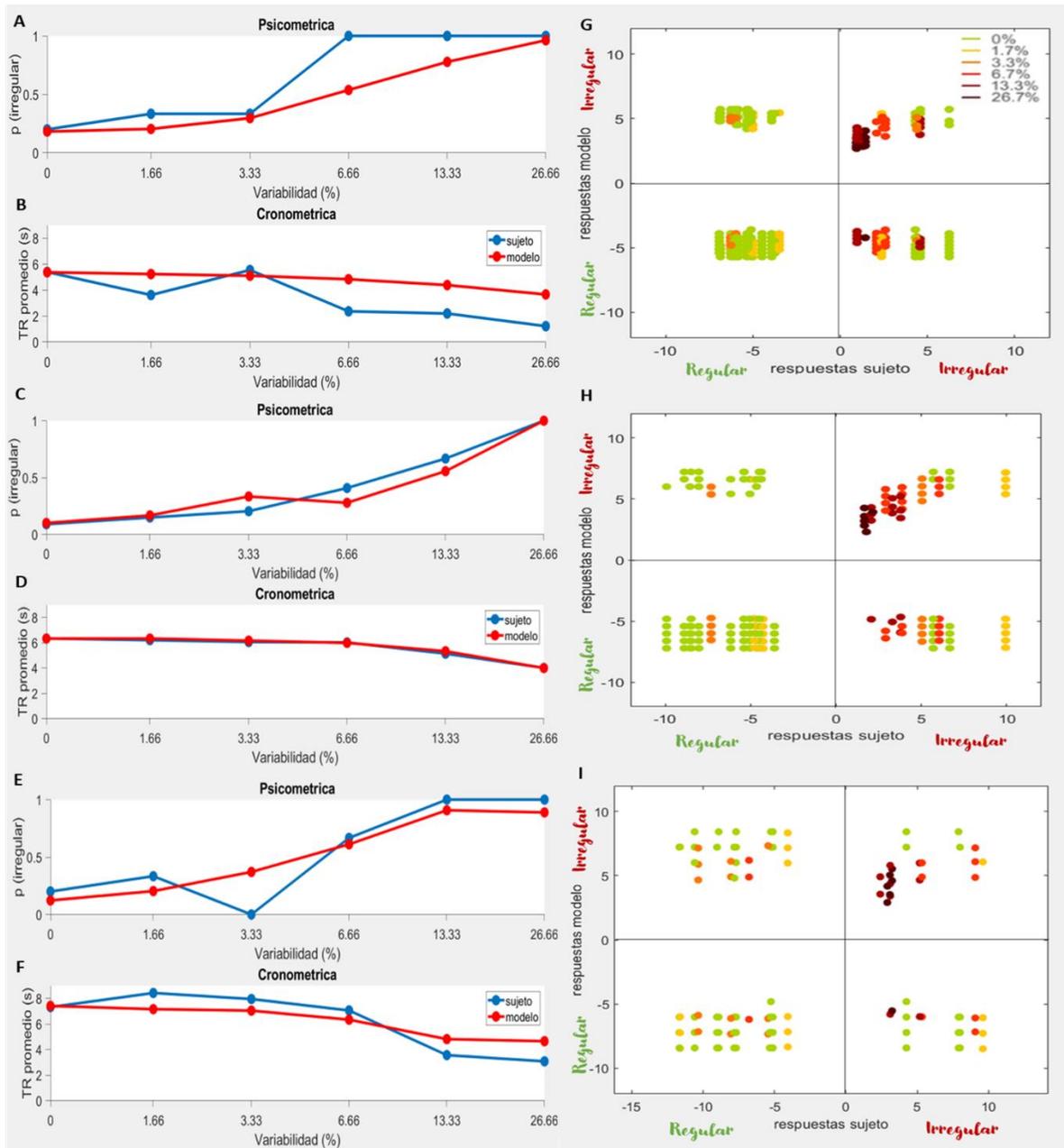


Figura 18. Resultados por Duración de Intervalos de uno de los sujetos con el modelo de Acumulación. Curvas psicométricas del promedio de respuestas irregulares para cada porcentaje de irregularidad (0, 1.66, 3.33, 6.66, 13.3, 26.66) que contestó uno de los sujetos (en azul) y lo que predijo el modelo con los parámetros óptimos probando la hipótesis de acumulación (en rojo) para los intervalos con duración de (A) 300 ms, (C) 600 ms y (E) 1200 ms. Curvas cronométricas mostrando el promedio del tiempo de reacción para cada porcentaje de irregularidad de uno de los sujetos y lo que predijo el modelo para los ensayos con duración de intervalos de (B) 300 ms, (D) 600 ms y (F) 1200 ms. Representación gráfica de la respuesta y el tiempo de respuesta del sujeto y lo que predijo el modelo de acumulación para cada uno de los ensayos con duración de intervalos de (G) 300 ms, (H) 600 ms y (I) 1200 ms; cada ensayo está representado por uno de los puntos, los valores negativos representan las respuestas regulares y los positivos las irregulares. Cuando los puntos coinciden en el signo en ambos ejes quiere decir que el modelo y el sujeto respondieron lo mismo en ese ensayo, de tal manera que el cuadrante inferior izquierdo nos muestra las respuestas regulares que predijo correctamente el modelo y el cuadrante superior derecho las respuestas irregulares en las que el modelo y el sujeto coincidieron. El código de color representa a cada una de las variabilidades de irregularidad.

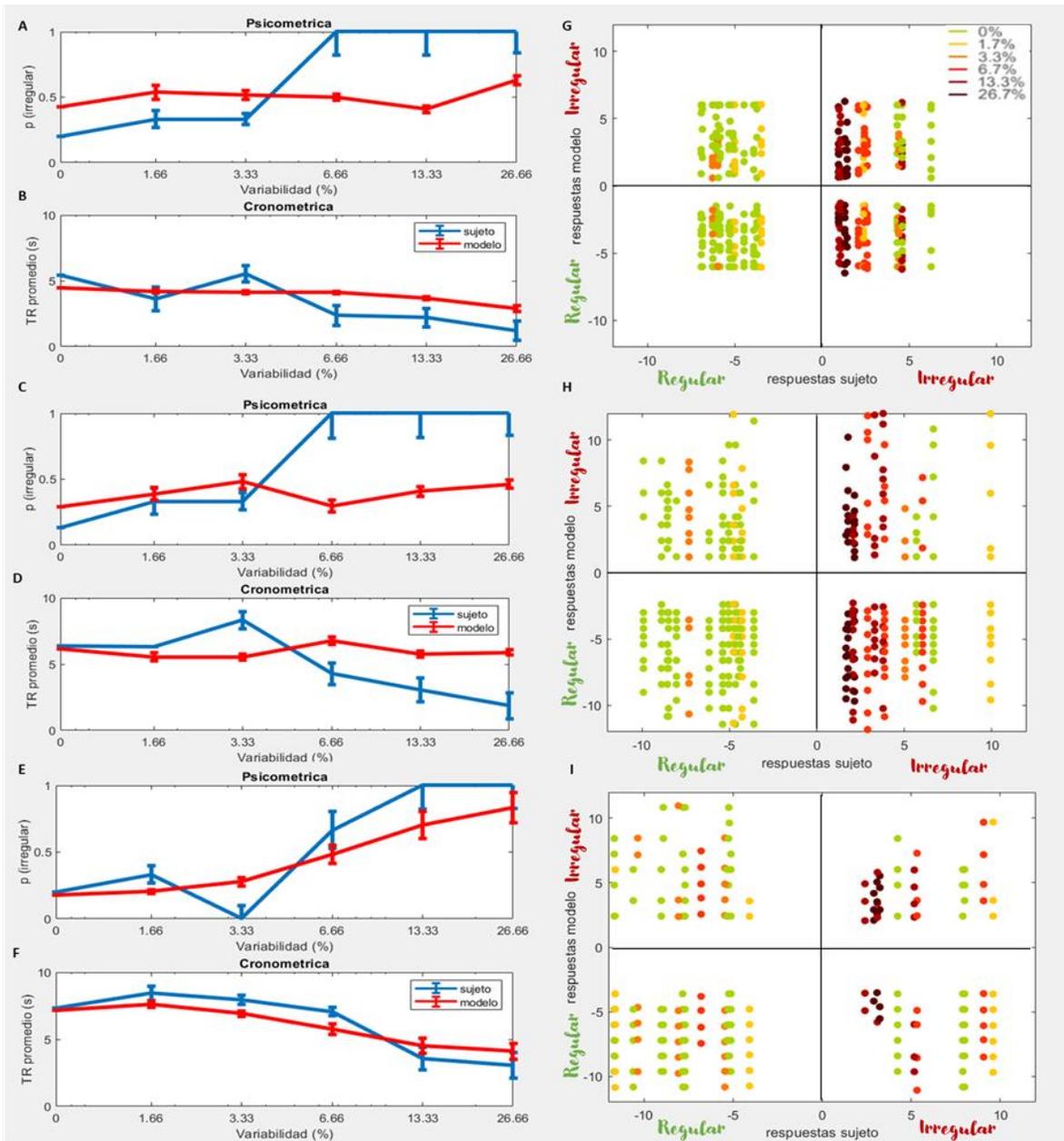


Figura 19. Resultados por Duración de Intervalos de uno de los sujetos con el modelo de Detección. Curvas psicométricas del promedio de respuestas irregulares para cada porcentaje de irregularidad que contestó uno de los sujetos (en azul) y lo que predijo el modelo con los parámetros óptimos probando la hipótesis de detección (en rojo) para los intervalos con duración de (A) 300 ms, (C) 600 ms y (E) 1200 ms. Curvas cronométricas mostrando el promedio del tiempo de reacción para cada porcentaje de irregularidad de uno de los sujetos y lo que predijo el modelo para los ensayos con duración de intervalos de (B) 300 ms, (D) 600 ms y (F) 1200 ms. Representación gráfica de la respuesta y el tiempo de respuesta del sujeto y lo que predijo el modelo de detección para cada uno de los ensayos con duración de intervalos de (G) 300 ms, (H) 600 ms y (I) 1200 ms; cada ensayo está representado por uno de los puntos; los valores negativos representan las respuestas regulares y los positivos las irregulares. El código de color representa a cada una de las variabilidades de irregularidad.

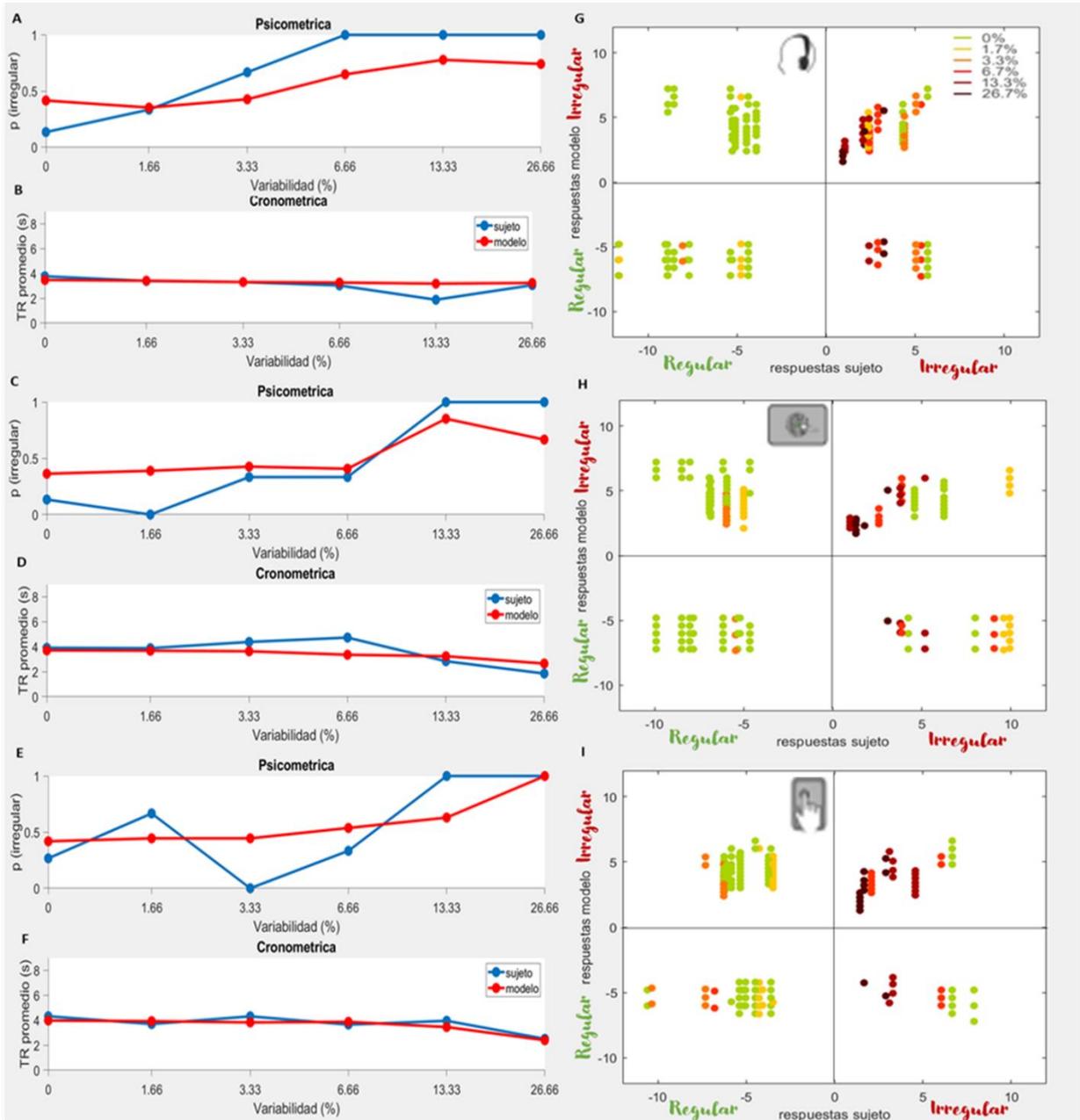


Figura 20. Resultados por Modalidad Sensorial de uno de los sujetos con el modelo de Acumulación. Curvas psicométricas del promedio de respuestas irregulares para cada porcentaje de irregularidad que contestó uno de los sujetos (en azul) y lo que predijo el modelo con los parámetros óptimos probando la hipótesis de acumulación (en rojo) para los estímulos (A) auditivos, (C) visuales y (E) táctiles. Curvas cronométricas mostrando el promedio del tiempo de reacción para cada porcentaje de irregularidad de uno de los sujetos y lo que predijo el modelo para los ensayos (B) auditivos, (D) visuales y (F) táctiles. Representación gráfica de la respuesta y el tiempo de respuesta del sujeto y lo que predijo el modelo de acumulación para cada uno de los ensayos (G) auditivos, (H) visuales y (I) táctiles. Cada ensayo está representado por uno de los puntos; los valores negativos representan las respuestas regulares y los positivos las irregulares. Cuando los puntos coinciden en el signo en ambos ejes quiere decir que el modelo y el sujeto respondieron lo mismo en ese ensayo, de tal manera que el cuadrante inferior izquierdo nos muestra las respuestas regulares que predijo correctamente el modelo y el cuadrante superior derecho las respuestas irregulares en las que el modelo y el sujeto coincidieron. El código de color representa a cada una de las variabilidades de irregularidad.

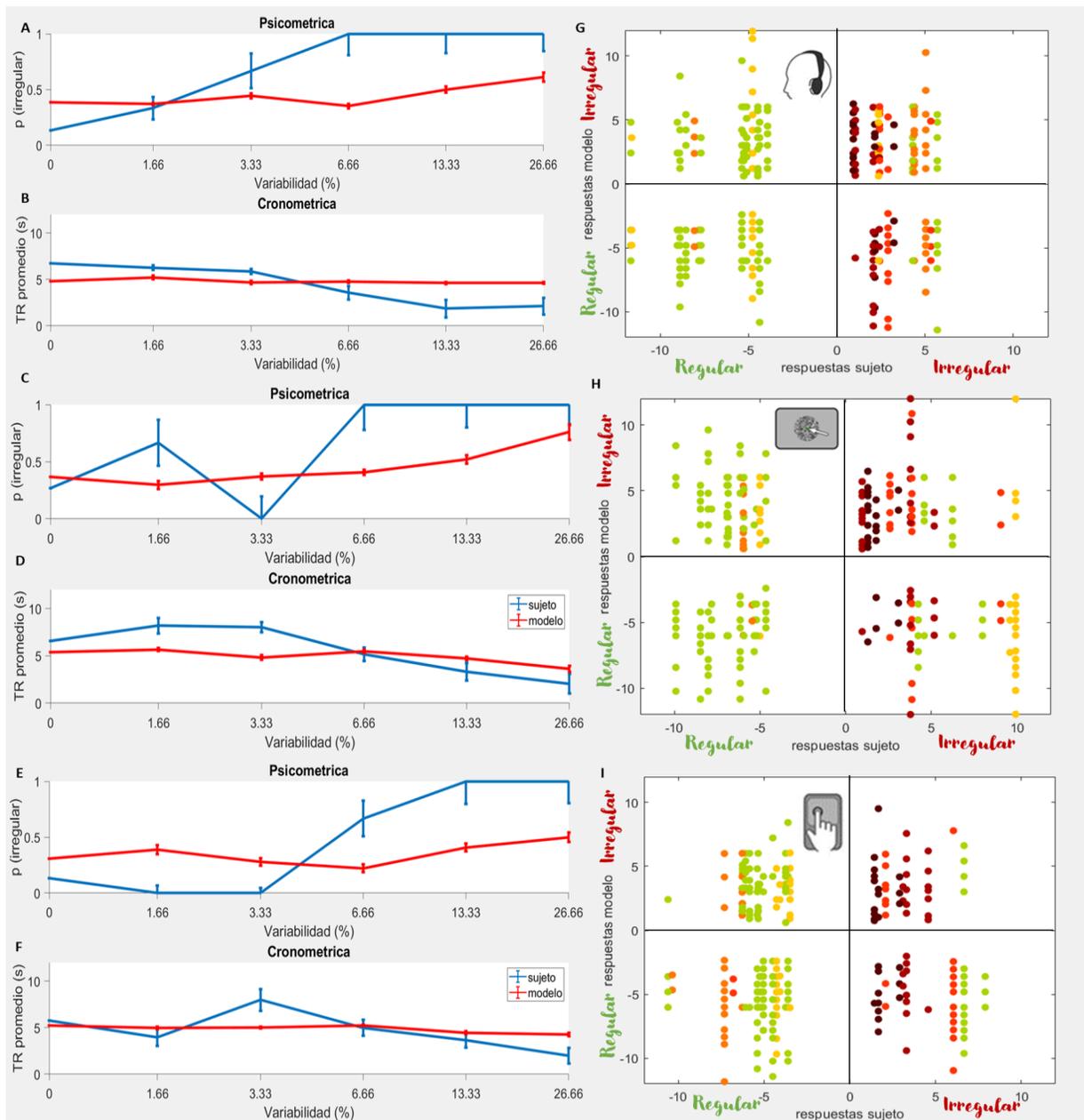


Figura 21. Resultados por Modalidad Sensorial de uno de los sujetos con el modelo de Detección. Curvas psicométricas del promedio de respuestas regulares para cada porcentaje de irregularidad que contestó uno de los sujetos (en azul) y lo que predijo el modelo con los parámetros óptimos probando la hipótesis de detección (en rojo) para los estímulos (A) auditivos, (C) visuales y (E) táctiles. Curvas cronométricas mostrando el promedio del tiempo de reacción para cada porcentaje de irregularidad de uno de los sujetos y lo que predijo el modelo para los ensayos (B) auditivos, (D) visuales y (F) táctiles. Representación gráfica de la respuesta y el tiempo de respuesta del sujeto y lo que predijo el modelo de acumulación para cada uno de los ensayos (G) auditivos, (H) visuales y (I) táctiles. Cada ensayo está representado por uno de los puntos; los valores negativos representan las respuestas regulares y los positivos las irregulares. El código de color representa a cada una de las variabilidades de irregularidad

Al analizar más detalladamente lo que sucede con el modelo de acumulación, se observa claramente que en el cuadrante superior derecho los datos forman una pendiente con un gradiente en el que los ensayos más irregulares están más abajo y entre más se acercan a la regularidad se ubican más arriba en la pendiente (Figura 22 A); es decir que entre más irregular es un estímulo se toma más rápidamente una decisión respecto a su irregularidad y entré más parecido es a un estímulo regular, es más difícil tomar una decisión y es necesario más tiempo para contestar. En lo que respecta a la modalidad sensorial (Figura 22 B) podemos ver una tendencia muy similar en los ensayos auditivos, los cuales están en la parte más baja de la pendiente indicando que la irregularidad en esta modalidad fue detectada mucho más rápido que en las otras dos; lo anterior corresponde a lo encontrada en los datos conductuales. Estos resultados nos hablan de que el modelo de acumulación es capaz de predecir las tendencias que existen en las respuestas de los sujetos.

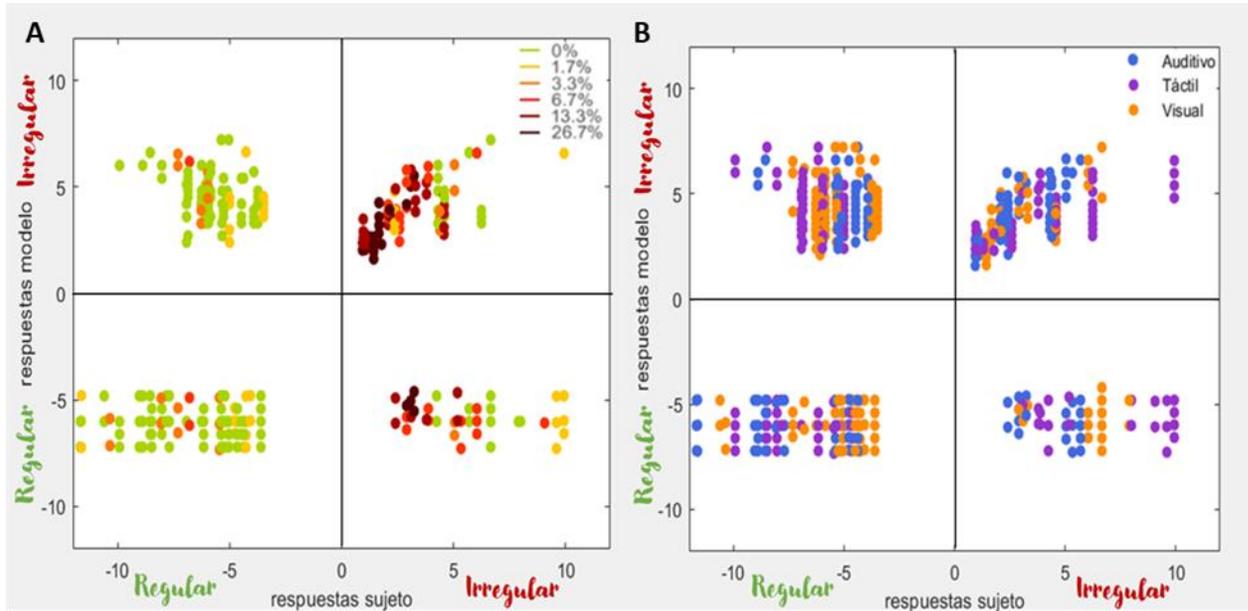


Figura 22. Gráficas de todos los ensayos de uno de los sujetos con el modelo de acumulación; por porcentaje de irregularidad de los ensayos (A) y por modalidad sensorial (B). Cada ensayo está representado por uno de los puntos.

7. DISCUSIÓN

El ajuste y la precisión de nuestro modelo nos permiten suponer que la toma de decisiones de identificación de ritmos (Regulares o Irregulares) se rige por un mecanismo en el que los intervalos de los estímulos se van comparando y la diferencia entre estos a la que denominamos evidencia, se va acumulando y sumando a lo largo de todo el estímulo hasta que este valor es lo suficientemente grande como para percibir un estímulo como irregular; si por el contrario esta acumulación de evidencia no alcanza un valor suficiente, el estímulo se percibirá como regular. El valor que establece la pauta para llegar a una decisión es el parámetro que en nuestro modelo denominamos umbral y que va a fluctuar entre los milisegundos y los tres segundos; el valor exacto va a variar entre individuos y las características del ensayo percibido.

En las curvas psicométricas del modelo, se observan las mismas tendencias que en las de los datos conductuales de los sujetos y en ambos casos hay un aumento en la identificación de estímulos irregulares conforme aumenta el porcentaje de irregularidad y esto tiene todo el sentido porque entre mayor es este porcentaje, los estímulos irregulares se identifican con mayor facilidad. Respecto a las curvas cronométricas, el modelo fue capaz de captar la tendencia a disminuir el tiempo de respuesta conforme aumentó el porcentaje de irregularidad.

Consistente con la literatura y con lo observado en los datos conductuales, el modelo logró captar que los participantes fueron más precisos y rápidos al momento de percibir estímulos auditivos que visuales o táctiles (Merchant et al. 2009).

Consideramos que el ajuste y la capacidad de predicción del modelo de acumulación es más que satisfactorio ya que logra explicar prácticamente el 70% de las respuestas de los individuos y la proporción de la varianza total explicada por la regresión del ajuste modelo/sujetos es alta (de hasta un 0.9339). Además, no esperábamos una capacidad de predicción del 100% porque hay múltiples factores como falta de atención o lapsus durante la tarea que están llevando a los participantes a contestar incorrectamente por errores ajenos a la percepción de los

estímulos. El hecho de que el modelo sea capaz de plasmar las tendencias observadas en los datos conductuales, como que la rapidez de la respuesta está relacionada con la variabilidad de la irregularidad y con la modalidad sensorial, es un indicador de su confiabilidad.

A pesar de haberse demostrado la eficiencia del modelo y que no se puede aspirar a una capacidad de predicción perfecta debido a los muchos factores desconocidos que intervienen en la toma de decisiones de cualquier organismo, es posible mejorarlo más. Un aspecto que considerar es cómo la dinámica aleatoria del estímulo y la incertidumbre generada por esto pueden estar afectando el procesamiento de dichos estímulos. Teniendo en cuenta que los estímulos previos pueden tener efecto en la percepción de los estímulos subsecuentes y más si consideramos que la evidencia se acumula y que el tiempo entre un estímulo y otro no es del todo largo para su olvido; proponemos que, para mejorar la capacidad de predicción, es necesario incorporar al modelo el historial de estímulos previos percibidos.

8. CONCLUSIÓN

Después de realizar un análisis ensayo por ensayo poniendo a prueba la precisión del modelo que construimos para determinar el mecanismo que rige la toma de decisiones en una tarea de detección de irregularidades temporales, podemos asegurar que el modelo de acumulación, si bien puede mejorar, tiene muy buen ajuste y capacidad de predicción. Esto nos permite reforzar la hipótesis de que nuestro cerebro para tomar decisiones de este tipo, en lugar de esperar una única desviación temporal grande, emplea un mecanismo en el que se toma en cuenta la evidencia generada a lo largo de todo el estímulo, la cual se va acumulando y sumando hasta que se toma una decisión.

REFERENCIAS

- Allman M.J., Teki S, Griffiths T.D. & Meck W.H. (2013). Properties of the internal clock: First- and second-order principles of subjective time. *Annual Review of Psychology*, 65, 743-771. DOI: 10.1146/annurev-psych-010213-115117.
- Bechara A., Tranel D., Damasio H. & Damasio AR. (1996). Failure to respond autonomically to anticipated future outcomes following damage to prefrontal cortex. *Cereb. Cortex* 6:215–25.
- Buhusi C.V. & Meck W.H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of Interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(10), 755-765. DOI: 10.1038/nrn1764.
- Call J. (2000). Representing space and objects in monkeys and apes. *Cognitive Science*, 24(3), 397-422. DOI: 10.1016/S0364-0213(00)00024-0
- Church R.M. (1984). Properties of the internal clock. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 423:566–82
- Dardente H. & Cermakian N. (2007). Molecular Circadian Rhythms in Central and Peripheral Clocks in Mammals. *Chronobiology International*, 24(2), 195-213. DOI: 10.1080/07420520701283693.
- Espinoza-Monroy M. & de Lafuente V.H. (2021). Discrimination of Regular and Irregular Rhythms Explained by a Time Difference Accumulation Model. *Neuroscience*, 459, 16-26. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2021.01.035.
- Fontes S. & Fontes A.I. (1994). Consideraciones teóricas sobre las leyes psicofísicas. *Rev de Psicol Gral y Aplic*, 47(4), 391-395.
- García-Maldonado G., Sánchez-Juárez I.G., Martínez-Salazar G.J. & Llanes-Castillo A. (2011). Cronobiología: Correlatos básicos y médicos. *Revista Médica del Hospital de México*, 74(2), 108-114.
- García-Pérez M.A. (2014). Does time ever fly or slow down? The difficult interpretation of psychophysical data on time perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(415), 1-19. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00415.
- Garrido M., Kilner J., Klaas E., Friston K. (2009). The mismatch negativity: A review of underlying mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, 3 (120), 453-463. DOI: 10.1016/j.clinph.2008.11.029.
- Georgopoulos A.P., Taira M. & Lukashin A. (1993). Cognitive neurophysiology of the motor cortex. *Science*, 260(5104), 47-52. DOI: 10.1126/science.8465199.
- Gibbon J., Church R.M. (1984). Sources of variance in an information processing theory of timing. In *Animal Cognition*, ed. HL Roitblat, TG Bever, HS Terrace, pp. 465–88. Hillsdale, NJ: Erlbaum

Gruart A., Delgado JM., Escobar C., Aguilar-Roblero R. (2002). *Los relojes que gobiernan la vida*. México: Fondo de Cultura Económica.

Harrington DL, Haaland K, Knight R. 1998. Cortical networks underlying mechanism of time perception. *J. Neurosci.* 18: 1085–95

Hastings M.H., Maywood E.S. & Brancaccio M. (2018). Generation of circadian rhythms in the suprachiasmatic nucleus. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(8), 453-469. DOI: 10.1038/s41583-018-0026-z.

Honing H. (2012). Without it no music: beat induction as a fundamental musical trait. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1252, 85–91. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2011.06402.x

Jantzen K.J., Steinberg F.L. & Kelso J.A.S. (2004). Brain networks underlying human timing behavior are influenced by prior context. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101: 6815-6820.

Kingdom F.A.A. & Prins N. (2010). *Psychophysics. A practical introduction*. San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press.

Kotz S.A., Schwartze M. & Schmidt-Kassow M. (2009). Non-motor basal ganglia functions: a review and proposal for a model of sensory predictability in auditory language perception. *Cortex* 45:982–90

Large E. W., & Palmer C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cogn. Sci.* 26, 1–37. DOI: 10.1016/S0364-0213(01)00057-X

Mendez J. C., Prado L., Mendoza, G. & Merchant, H. (2011). Temporal and spatial categorization in human and non-human primates. *Front. Integr. Neurosci.* 5:50. DOI: 10.3389/fnint.2011.00050

Merchant H., Battaglia-Mayer A. & Georgopoulos, A. P. (2003). Interception of real and apparent circularly moving targets: psychophysics in human subjects and monkeys. *Exp. Brain Res.* 152, 106–112. DOI: 10.1007/s00221-003-1514-5

Merchant H. & Georgopoulos A.P. (2006). Neurophysiology of Perceptual and Motor Aspects of Interception. *J Neurophysiol*, 95: 1-13. DOI: 10.1152/jn.00422.

Merchant H., Zarco W. & Prado L. (2007). Do We Have a Common Mechanism for Measuring Time in the Hundreds of Millisecond Range? Evidence From Multiple-Interval Timing Tasks. *J Neurophysiol*, 99: 939-949. DOI: 10.1152/jn.01225.

Merchant H., Harrington DL, Meck WH. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annu. Rev. Neurosci.* 36:313–36.

Merchant H. & de Lafuente V. (2014). Introduction to the neurobiology of Interval timing (Chapter 1). En Merchant H. & de Lafuente V.(Eds.), *Neurobiology of Interval timing* (1-13). New York: Springer.

Merchant H. & Honing H. (2014). Are non-human primates capable of rhythmic entrainment? Evidence for the gradual audiomotor evolution hypothesis. *Frontiers in Neuroscience.* 274. DOI: 10.3389/fnins.2013.00274.

- Mita A, Mushiake H, Shima K, Matsuzaka Y, Tanji J. (2009). Interval timing coding by neurons in the presupplementary and supplementary motor areas. *Nat. Neurosci.* 12:502–7
- Nussbaum S., Liberman N. & Trope Y. (2006). Predicting the near and distant future. *J. Exp. Psychol. Gen.* 135:152–61.
- Onoe H, Komori M, Onoe K, Takechi H, Tsukada H, Watanabe Y. (2001). Cortical networks recruited for time perception: a monkey positron emission tomography (PET) study. *NeuroImage* 13:37–45
- Oshio K, Chiba A, Inase M. (2008). Temporal filtering by prefrontal neurons in duration discrimination. *Eur. J. Neurosci.* 28:2333–43
- Romo R., Hernández A., Zainos A., Brody C.D. & Lemus L. (2000). Sensing without Touching: Psychophysical Performance Based on Cortical Microstimulation. *CellPress*, 26(1): 273-278. DOI: 10.1016/S0896-6273(00)81156-3.
- Selezneva E., Deike S., Knyazeva S., Scheich H., Brechmann A., & Brosch M. (2013). Rhythm sensitivity in macaque monkeys. *Front. Syst. Neurosci.* 7:49. DOI: 10.3389/fnsys.2013.00049
- Sprung L. & Sprung H. (1983). Gustav Theodor Fechner y el surgimiento de la psicología experimental. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 15(3), 349-368.
- Treisman M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: implications for a model of the “internal clock.” *Psychol. Monogr.* 77(13):1–31
- Yumoto N, Lu X, Henry TR, Miyachi S, Nambu A, et al. (2011). A neural correlate of the processing of multi-second time intervals in primate prefrontal cortex. *PLoS ONE* 6(4): e19168
- Zarco W., Merchant H., Prado L. & Mendez J.C. (2009). Subsecond Timing in Primates: Comparison of Interval Production Between Human Subjects and Rhesus Monkeys, *Journal of Neurophysiology*, 102, 3191-3202. DOI: 10.1152/jn.00066.