

**Seminario  
Investigación e Innovación  
en Prevención de  
Accidentes de Trabajo y  
Enfermedades Profesionales**



**INGENIERIA INDUSTRIAL**  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Superintendencia  
de Seguridad  
Social

Gobierno de Chile

## **Caracterización de Fatiga Física y Mental Asociada a Tareas Laborales a Través del Sensado y Procesamiento de Señales Psicofisiológicas**

**Director: Ángel Jiménez, Ph.D.**

Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile

[ajimenez@dii.uchile.cl](mailto:ajimenez@dii.uchile.cl)

Integrantes IST: Francisco Miranda, Kurt Reinke

Integrantes U de Chile: Jorge Gaete, Cristian Retamal, Marcelo Riquelme, Ignacio Vargas.





# Contenidos

- Introducción
- Marco Teórico
- Definición del problema
- Trabajo relacionado
- Hipótesis de Investigación
- Métodos
- Resultados
- Conclusiones
- Trabajo futuro

## Relevancia de la fatiga en la seguridad laboral

4% del PIB mundial (OIT)

18% al 20% del presupuesto de las operaciones.

40% de los accidentes laborales y en el 23% de los incidentes graves o muy graves.



### Oportunidad

Utilizar tecnología poco invasiva para caracterizar labores en función de la fatiga que inducen en los trabajadores.

### Enfoque

1.- Utilizar sensores psicofisiológicos para identificar características multimodales que expliquen de manera inesgada la fatiga de los trabajadores durante sus actividades.

2.- Automatizar la identificación de patrones de fatiga en base a tales características.



## Definiciones básicas

- **Fatiga:** cualquier pérdida de eficiencia en la ejecución de una tarea o como la aversión a cualquier tipo de esfuerzo (Grandjean, 1970).
- **Estrés:** cualquier respuesta no específica del cuerpo ante cualquier demanda (Selye, 1956) que desencadene una serie de reacciones de patrones complejos con componentes fisiológicos, cognitivos y de comportamiento (Feuerstein et al., 1986)
- **Relación entre fatiga y estrés:** fatiga es el resultado psicofisiológico de periodos prolongados de estrés físico y cognitivo (Boksem, 2008)
- **Estrés en el trabajo:** surge tanto ante un mal ajuste entre la demanda de tareas con las capacidades de los trabajadores (Van Daalen, et al., 2009). Estrés por aburrimiento o demanda excesiva (Ryu and Myung, 2005)

## Enfoques de estimación de fatiga

- **Medidas subjetivas:** estimación y auto reporte de la fatiga (cuestionarios, tests, etc.). Problemas de sesgo.
- **Medidas de rendimiento:** cuantificación de la habilidad del sujeto para concentrarse en la tarea, mediante la identificación de comportamientos relacionados con la fatiga (tiempos de reacción, ejecución, test CPT o N-back)
- **Medidas psicofisiológicas:** estimación inesgada de la fatiga mediante la respuesta del sistema nervioso autónomo, medida a través de señales psicofisiológicas (EEG, ECG, EMG, PPG, EDA, temperatura corporal, frecuencia de pestañeo, tasa de apertura del ojo, etc.)
- **Medidas contextuales:** estimación en base a variables contextuales (ruido, nivel de gases, temperatura, luminosidad, etc.)

## Problema de Investigación

¿Es posible identificar niveles de fatiga en usuarios que ejecutan una tarea laboral basándose en sus señales psicofisiológicas?

## Hipótesis de Investigación

**H1:** Las señales psicofisiológicas de los sujetos durante la tarea, presentan diferencias significativas para las condiciones “fatiga” y “no fatiga”.

**H2:** La fatiga experimentada por los sujetos durante la ejecución de la actividad laboral se puede clasificar utilizando sus señales psicofisiológicas.



# Trabajo relacionado

Ref.	Objetivo	N° part.	Tipo de faena	N° de tareas	Señales	Medida subjetiva	Mide	Resultados
Aryal et al. (2017)	Detectar fatiga física con sensores biométricos.	12	Construcción	1 (200 repeticiones)	EEG, HR, ST (en casco)	Borg's RPE.	Fatiga Física	82,6% (ST, HR)
Hwang & Lee (2017)	Relación entre HR y fatiga física.	19	Construcción	1 actividad por profesión 5 profesiones.	HR reserve (%HRR) (pulsera)	-	Fatiga Física	Dda física es variable en función de su patrón de trabajo.
Chen et al. (2016)	Este estudio desarrolla un casco de seguridad de monitorización EEG portátil.	5	Construcción	4	EEG (4 elec) (en casco)	-	Fatiga Mental	Existen patrones de señal distintivos en diferentes niveles de riesgo. El EEG se puede utilizar para evaluar la carga de trabajo mental.
Yen-Hui, Chih-Yong, Shih-Yi (2009)	Physical discomfort and psychosocial job stress among male and female operators at telecommunication call centers in Taiwan.	1023	Call centers	1 (atención telefónica)	-	Cuestionarios autoinformados, información demográfica, estado de salud.	Estrés laboral	Trabajar en un centro de llamadas durante más de 4 años está fuertemente asociado con la incomodidad en todas las áreas del cuerpo y otros problemas de salud.
Lin, Chen, Hong, Lin (2010)	Customer-induced stress in call centre work: A comparison of audio and video-conference.	96	Call centers	2 (teléfono, videoconferencia)	Niveles de inmunoglobulina A (IgA) en saliva	Cuestionarios autoinformados.	Estrés laboral	Antipatía del cliente genera más tensión y peor rendimiento. Inducción de la presión de tiempo aumentó los niveles de IgA (aumento de estrés).

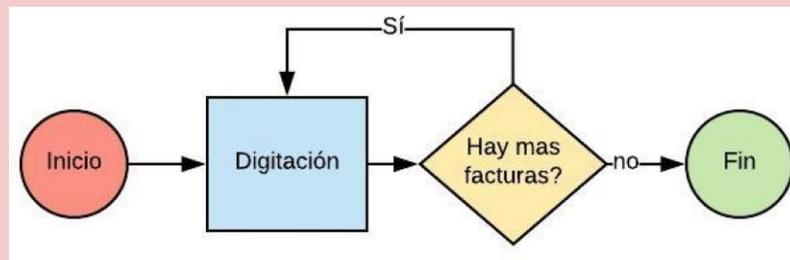
## Algunas soluciones comerciales



## Descripción de la tarea

Actividades a realizar por **cada factura** digitada:

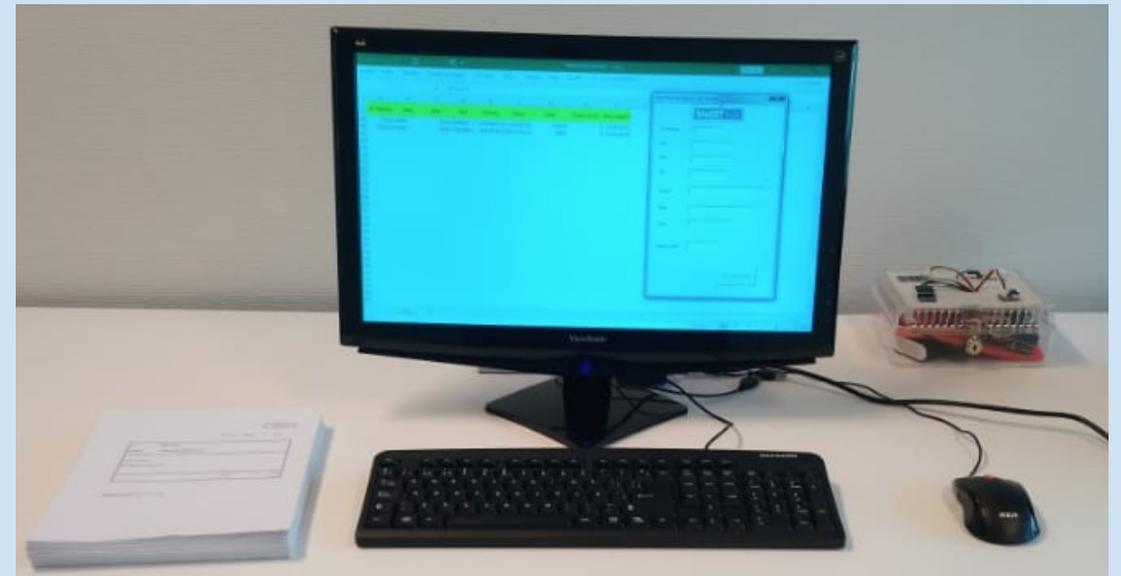
- Leer un documento físico
- Escribir su contenido en un formulario digital
- Buscar un nuevo documento



## Entorno de ejecución

Entorno directo: escritorio (foto) y silla ajustable para comodidad del ejecutante.

Entorno indirecto: oficina aislada de ruidos, presenta muy poca injerencia sobre los ejecutantes.





# Métodos: procedimiento y muestra

Participantes	Género	Edad
8	1 mujer (1 hombre descartado)	Media = 25,63 SD = 5,65 Min = 20, max = 41

## ANTES

- 1.- Descripción del experimento, completar información del participante y consentimiento informado.
- 2.- Instalación de sensores.
- 3.- Registro de línea de base.



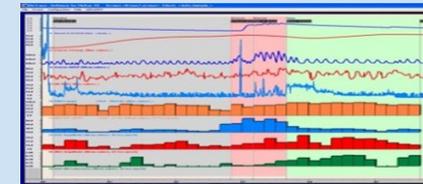
## DURANTE

- 1.- Inicio ejecución de tarea.
- 2.- Reportar nivel de fatiga y contestar subtarea cada 10 minutos.
- 3.- Al término, registro de línea de base



## DESPUÉS

- 1.- Desinstalar sensores.
- 2.- Reportar situaciones relevantes o anómalas.
- 3.- Rescate y guardado de datos para análisis.





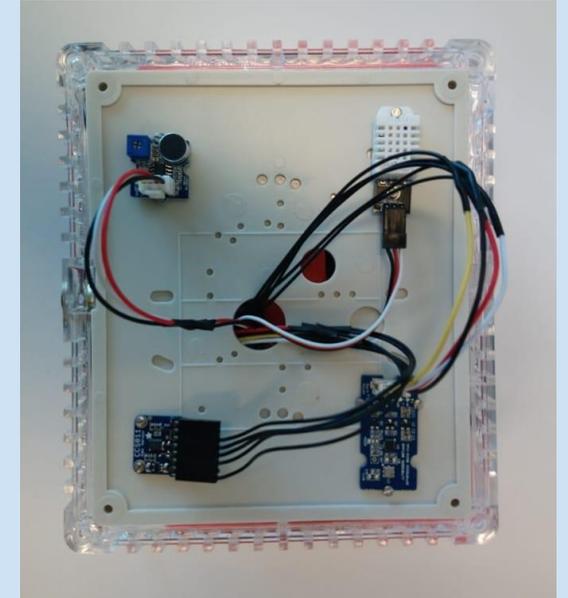
# Métodos: apparatus

## Sensores Psicofisiológicos



Plataforma	Sensor	Descripción sensores incluidos	Lecturas por segundo (Hz)
BioMonitor (desarrollo propio)	Temperatura (GA10K3A1AM)	Sensor análogo de temperatura (C°), rango de 31°C y 44°C	entre 1 y 20
	EDA (GARY)	Sensor análogo de impedancia de la piel (mAh)	entre 1 y 100
	PPG (Max30101)	Sensor análogo (foto diodo) que mide la absorción de haz de luces en la piel	50 ó 100
Shimmer	Inercial MPU9250	Sensor análogo de aceleración (g) y velocidad angular (rad°)	entre 5 y 100
	PPG (Shimmer)	Sensor análogo que mide la absorción de haz de luces en la piel	100

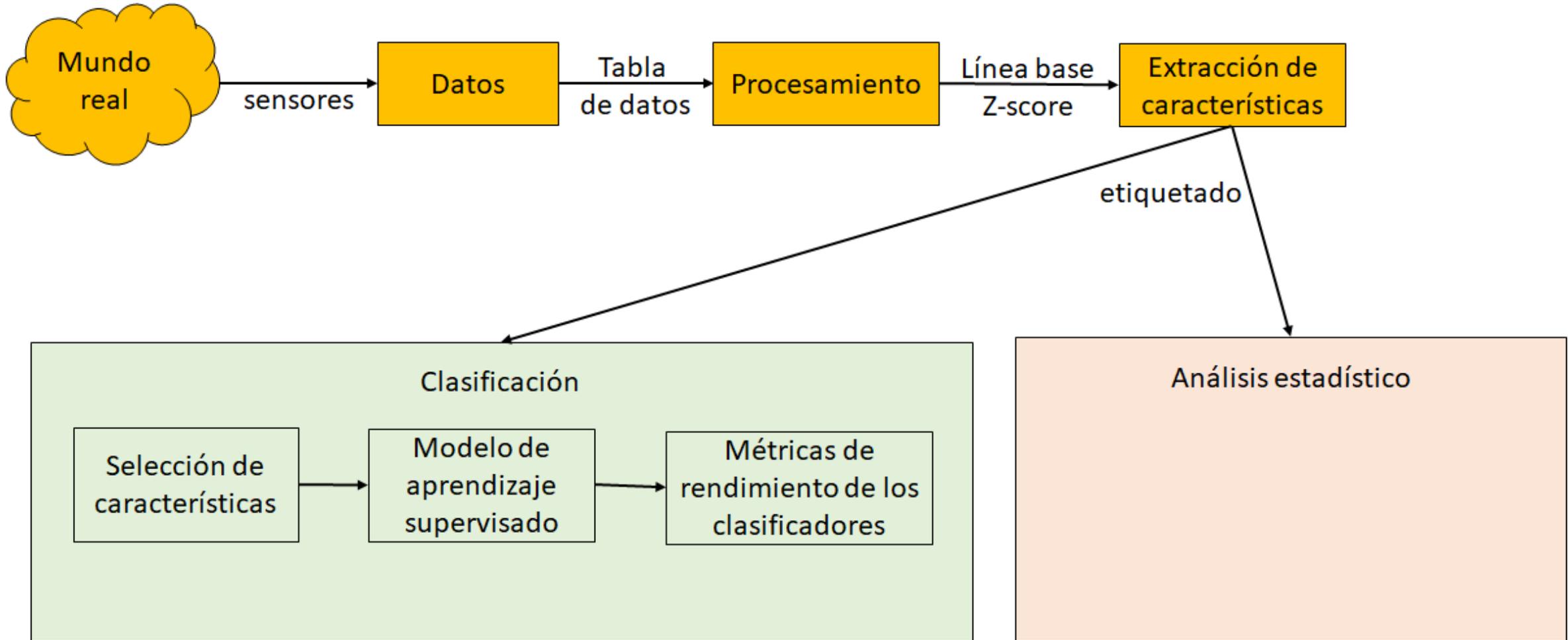
## Sensores Contextuales



### Sensores incluidos

Plataforma de monitoreo contextual: CO2, temperatura, ruido ambiental, movimiento (acc y gyro), humedad.

# Métodos: metodología de procesamiento y análisis de señales





## ¿Cómo se etiqueta?

- No fatiga: segundo cuarto de la ejecución de la tarea.
- Fatiga: cuarto cuarto de la ejecución de la tarea.

(Laurent et al., 2013; Awais et al., 2017; Choi et al., 2018)

## Etiquetado de zona fatiga/no fatiga

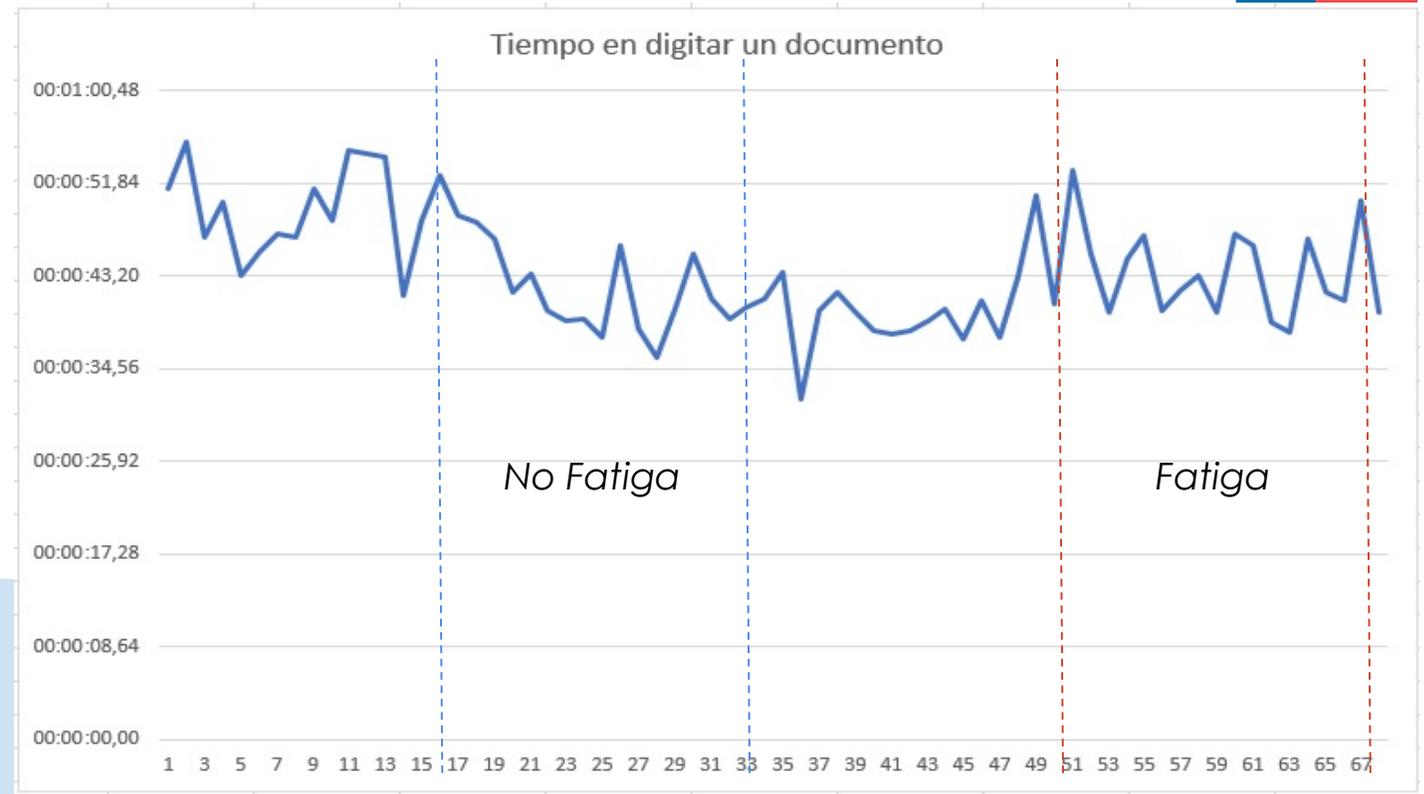
### 1.- Literatura: Definición de áreas de “fatiga”

(Laurent et al., 2013; Awais et al., 2017; Choi et al., 2018)

- No Fatiga: al inicio de la ejecución, excluyendo el inicio (aprendizaje).
- Fatiga: período cercano al final de la ejecución.

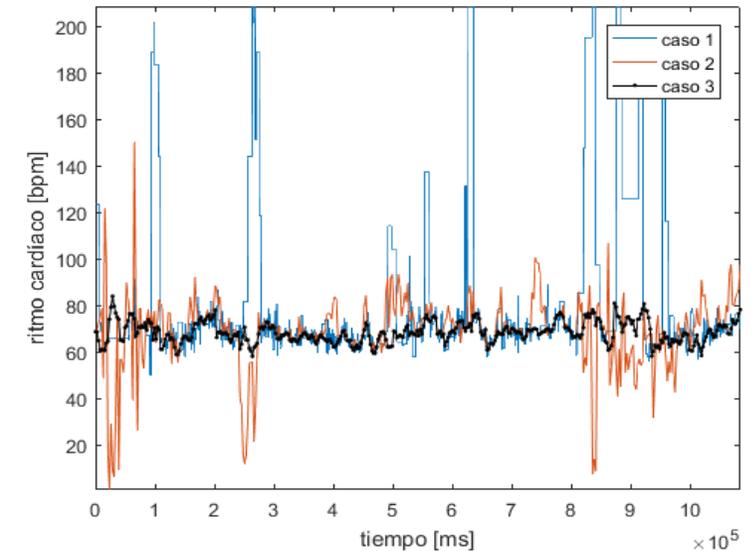
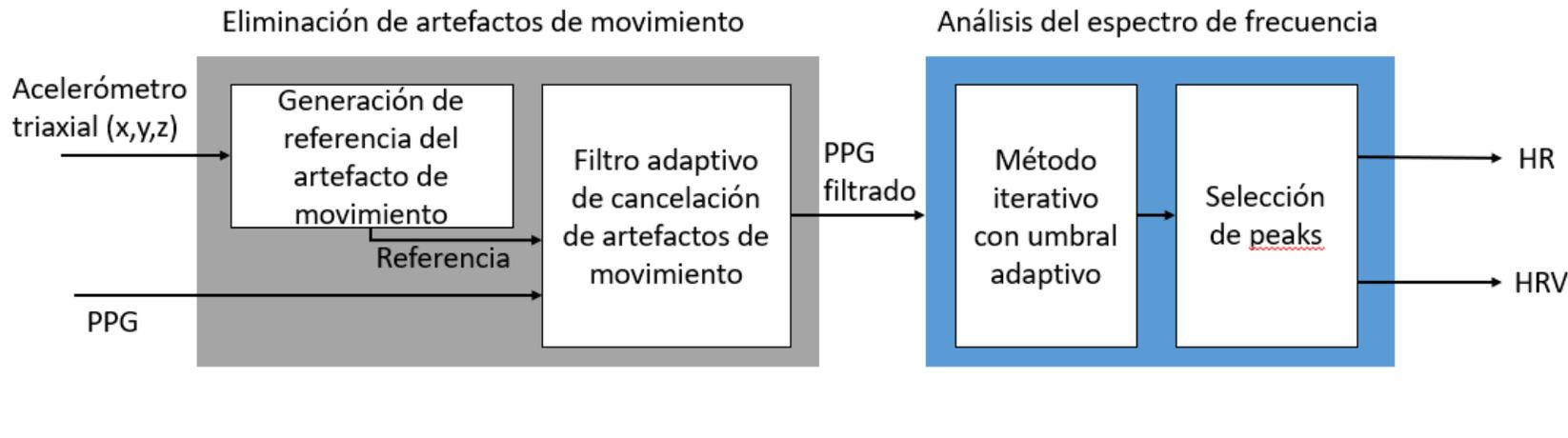
### 2.- Observaciones del experimentador: cambios en la conducta del sujeto experimental:

- Cambios en la postura en silla, respiración más profunda, emisión de ruidos, estiramientos, pausas, bostezos, gestos más bruscos, aumento de pestañeos.
- Cada sesión experimental queda respaldada por registro de videocámara del sujeto y grabación de pantalla.



# Métodos: procesamiento de datos

- El procesamiento de datos es fundamental para obtener buenas señales para trabajar.
- El principal desafío es el procesamiento de señales capturadas en movimiento. Para eso se aplican algoritmos que consideran señales obtenidas por el sensor de movimiento para realizar un mejor filtrado.



# Métodos: extracción de características

## Muestras:

- Con la captura de datos de 7 participantes se analizan las señales en ventanas de tiempo de 5 minutos con traslape cada 10 segundos. De esto se obtienen 833 observaciones para entrenar el modelo de clasificación.

## Normalización de las señales intra y entre sujetos:

- Línea base:** Se resta el promedio de la medición previamente hecha sin ejecución de tareas. Esto permite observar las variaciones del propio individuo.
- Z-score:** Se aplica este estadístico para comparar las respuestas psicofisiológicas entre sujetos para una misma tarea.

PPG	meanHR	Promedio del ritmo cardíaco
	stdHR	Desviación estándar del ritmo cardíaco
	rangeHR	rango del ritmo cardíaco
	meanHRV	Promedio de la variabilidad del ritmo cardíaco
	stdHRV	desviación estándar de la variabilidad del ritmo cardíaco
	rmsdHRV	Error cuadrático medio de la variabilidad del ritmo cardíaco
	VLF	Potencia de la componente de frecuencia del HRV entre 0,003-0,04 Hz
	LF	Potencia de la componente de frecuencia del HRV entre 0,04-0,15 Hz
	HF	Potencia de la componente de frecuencia del HRV entre 0,15-0,4 Hz
	TP	Potencia total de la componente de frecuencia del HRV
ratioLFHF	Tasa entre LF y HF	
EDA	meanEDA	Promedio de la actividad electrodérmica
	stdEDA	Desviación estándar de la actividad electrodérmica
	meanSCL	Promedio del nivel de conductancia de la piel
	meanSCR	Promedio de la respuesta de conductancia de la piel
	rangeSCL	Rango del nivel de conductancia de la piel
	maxSCR	Valor máximo de la respuesta de conductancia de la piel
	NpeakSCR	Número de peaks de la respuesta de conductancia de la piel
SKT	meanSKT	Promedio de la temperatura corporal
	stdSKT	Desviación estándar de la temperatura corporal
	rangeSKT	Rango de la temperatura corporal

# Resultados: respuesta a la hipótesis 1, evidencia

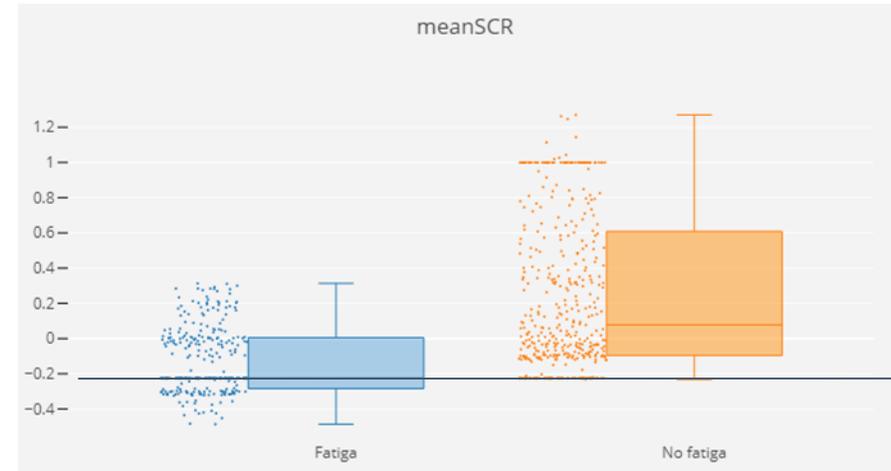
**H1:** Las señales psicofisiológicas de los sujetos, durante la tarea, presentan diferencias significativas para las condiciones “fatiga” y “no fatiga”.

Feature	Promedio fatiga	Desv. fatiga	Promedio no fatiga	Desv. no fatiga	p-valor
meanHR	-0.02	0.59	0.19	0.53	0.000 ***
stdHR	0.72	0.23	0.62	0.24	0.000 ***
rangeHR	2.91	0.65	2.85	0.87	0.790
meanHRV	0.05	0.21	0.01	0.18	0.000 ***
stdHRV	1.00	0.23	0.95	0.20	0.007 ***
rmssdHRV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.257
VLF	0.37	0.29	0.41	0.34	0.294
LF	0.33	0.17	0.37	0.22	0.206
HF	0.34	0.12	0.35	0.17	0.696
TP	0.33	0.23	0.38	0.34	0.236
ratioLFHF	1.07	0.72	1.14	0.74	0.110
meanEDA	-0.08	0.87	-0.05	0.73	0.048 **
stdEDA	0.14	0.11	0.17	0.14	0.008 ***
meanSCL	0.31	0.92	-0.47	0.55	0.000 ***
meanSCR	-0.11	0.63	0.26	0.44	0.000 ***
rangeSCL	0.62	0.46	0.46	0.31	0.000 ***
maxSCR	1.12	1.75	1.62	1.44	0.000 ***
NpeakSCR	32.01	21.40	32.03	22.09	0.799
meanSKT	-0.52	0.72	0.42	0.44	0.000 ***
stdSKT	0.10	0.07	0.13	0.10	0.000 ***
rangeSKT	0.34	0.23	0.44	0.33	0.001 ***

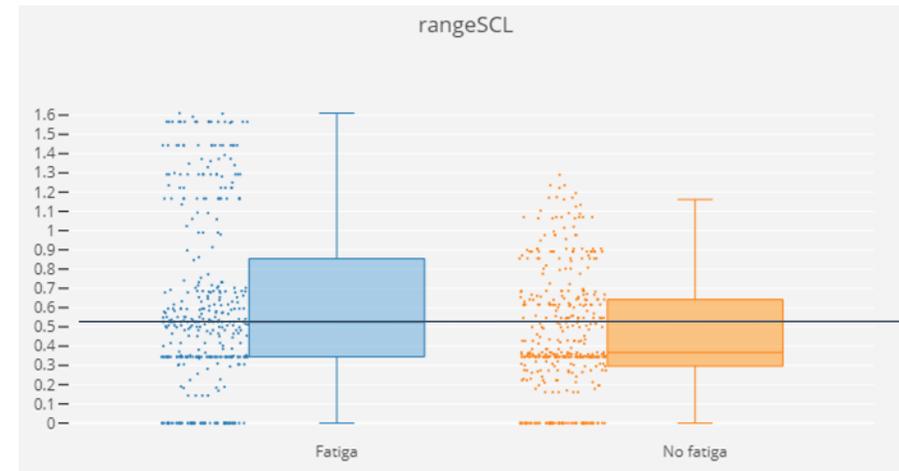
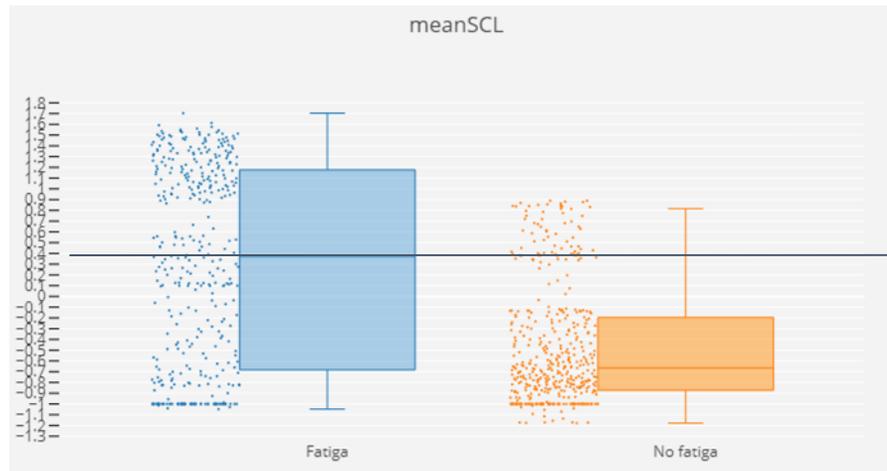
\*\*\* p<0.01 \*\*p<0.05

- **Eliminación de outliers**
- **Test de normalidad:** las poblaciones no son normales
- **Test Kruskal-Wallis H-test:** Hipótesis nula: la mediana de la población de los grupos es igual.
- **Existe diferencia significativa de la mediana de las señales psicofisiológicas entre las condiciones fatiga y no fatiga**

# Resultados: respuesta a la hipótesis 1, evidencia

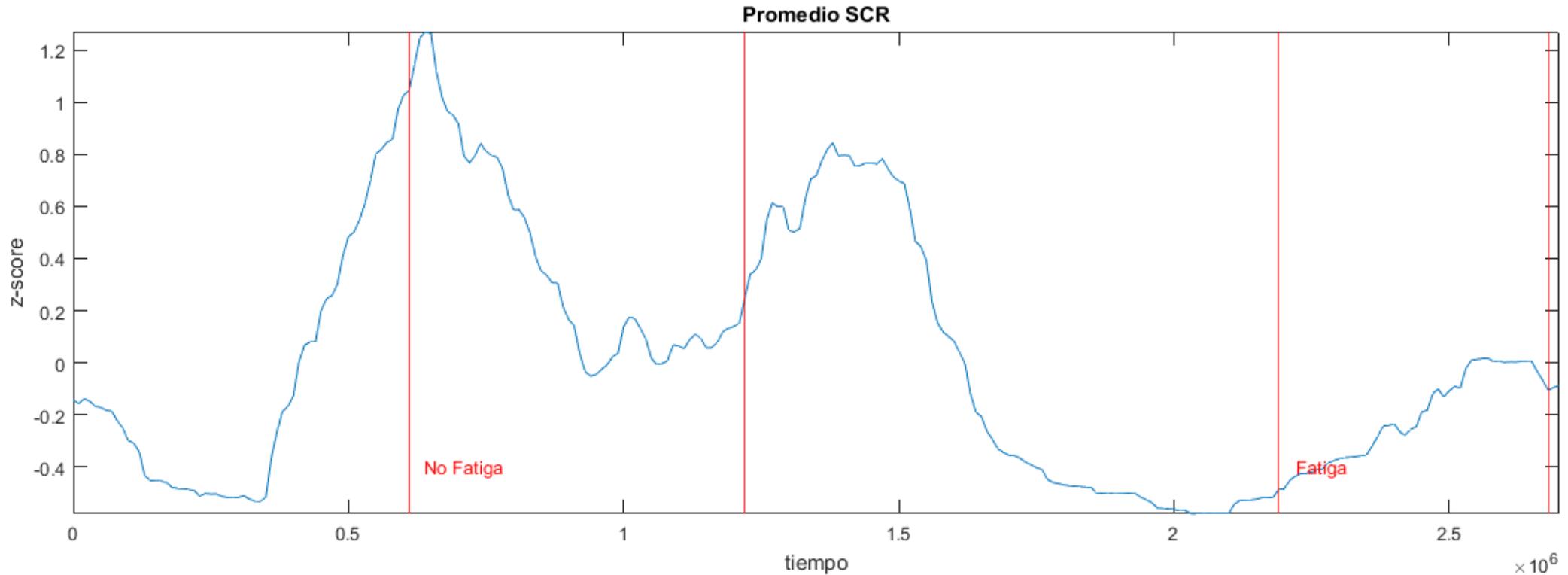


Fatiga  
 No fatiga





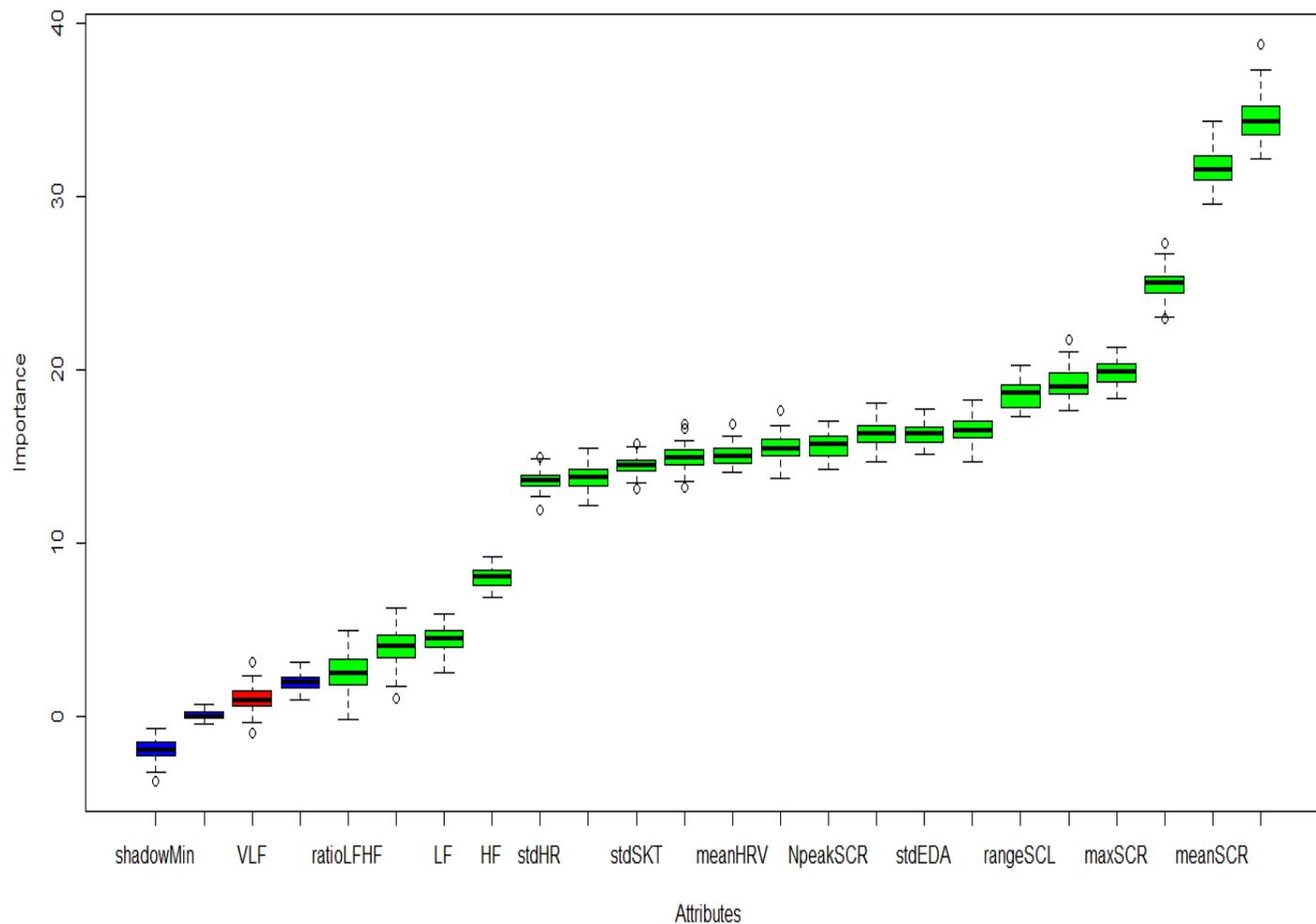
# Validación de etiquetado



- Análisis estadístico y áreas de fatiga: Se observa que la señal de EDA se correlaciona naturalmente con las áreas de fatiga definidas
- Con esta validación de las áreas de “no fatiga” y “fatiga” se procede a la clasificación de fatiga

# Resultados: selección de características

- Este es un paso previo a la clasificación donde se aplica un modelo de aprendizaje de máquinas que calcula cuánto aporta al modelo de clasificación (varianza) cada una de las características.
- Recurrent feature selection (random forest)
- En este caso el modelo propone eliminar la característica “VLF”.

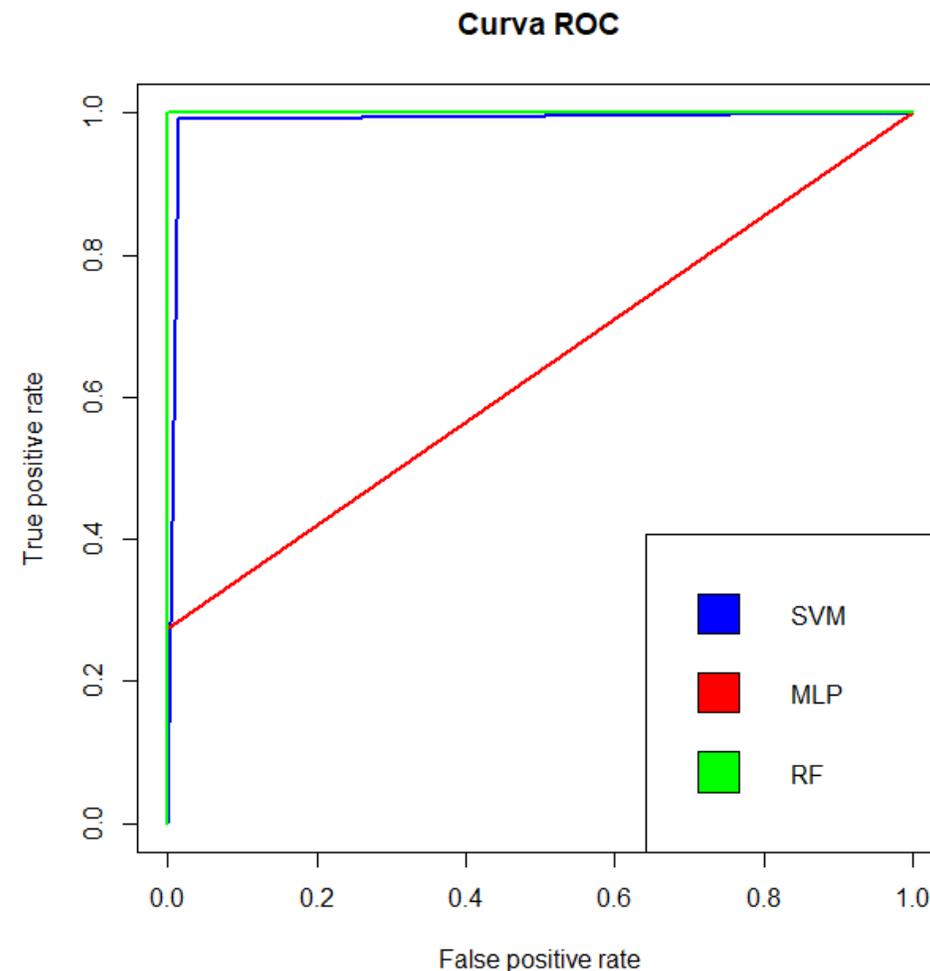


# Resultados: respuesta a la hipótesis 2, evidencia

**H2:** La fatiga experimentada por los sujetos durante la ejecución de la actividad laboral se puede clasificar utilizando sus señales psicofisiológicas.

- Se aplican tres modelos de clasificación: *Support Vector Machines (SVM)*, *Multilayer Perceptron (MLP)* y *Random Forest (RF)*.
  - 10-fold cross-validation.
- Se obtienen distintos indicadores de desempeño para cada clasificación.
- De los resultados obtenidos se observa que es posible obtener un alto desempeño de clasificación utilizando señales psicofisiológicas.

	SVM	MLP	RF
Accuracy	98,82%	67,09%	99,62%
Precision	99,24%	63,83%	100,00%
Recall	98,48%	99%	99,24%
F1	98,86%	77,42%	99,62%
Kappa	97,58%	35,52%	99,19%





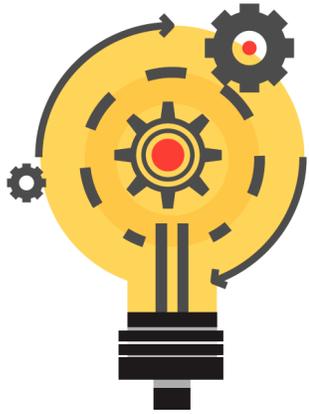
# Conclusiones

- **Uso de sensores psicofisiológicos:**
  - Biomonitor de desarrollo propio.
  - Algoritmos de limpieza de señales que consideran movimiento.
  - Extracción de características multimodales.
  - **H1:** Explican significativamente la fatiga de los participantes durante actividad de digitación.
  - Tecnología poco invasiva.
- **Automatización de la extracción de patrones de fatiga en base a tales características:**
  - Selección de características (EDA, PPG, TEMP, ACC, GYRO)
  - **H2:** Clasificación de niveles de fatiga con alto desempeño.
  - Estadístico kappa = 99.19 % con Random Forest.



# Trabajo Futuro

- Dos extensiones:
  - Expansión participantes tarea de digitación, 20 usuarios.
  - Tarea de reposición de mercaderías (laboratorio), 20 usuarios.
  - Tarea de conducción de bus en camino de montaña (real)
- Tarea de conducción:
  - En conjunto con empresa Tandem e IST.
  - Ruta Santiago-Los Bronces.
  - 20 conductores, uso de Biomonitor.
  - Inclusión de sensores de contexto (CO<sub>2</sub>, temperatura ambiental, ruido, acc,, gyro, GPS)
- Entregable final: desarrollo metodológico.
  - Desarrollar un nuevo enfoque metodológico que permita mayor validez ecológica y granularidad en la adquisición y análisis de información incesgada relacionada con fatiga física y mental durante la ejecución de las tareas laborales.



**Seminario  
Investigación e Innovación  
en Prevención de  
Accidentes de Trabajo y  
Enfermedades Profesionales**



**INGENIERIA INDUSTRIAL**  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Superintendencia  
de Seguridad  
Social

Gobierno de Chile

## **Caracterización de Fatiga Física y Mental Asociada a Tareas Laborales a Través del Sensado y Procesamiento de Señales Psicofisiológicas**

**Director: Ángel Jiménez, Ph.D.**

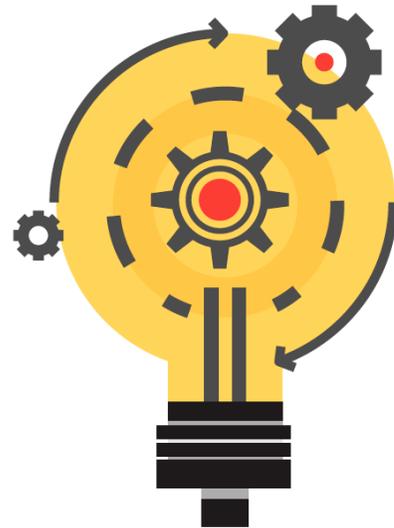
Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile

[ajimenez@dii.uchile.cl](mailto:ajimenez@dii.uchile.cl)

Integrantes IST: Francisco Miranda, Kurt Reinke

Integrantes U de Chile: Jorge Gaete, Cristian Retamal, Marcelo Riquelme, Ignacio Vargas.





## Seminario Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes de Trabajo y Enfermedades Profesionales

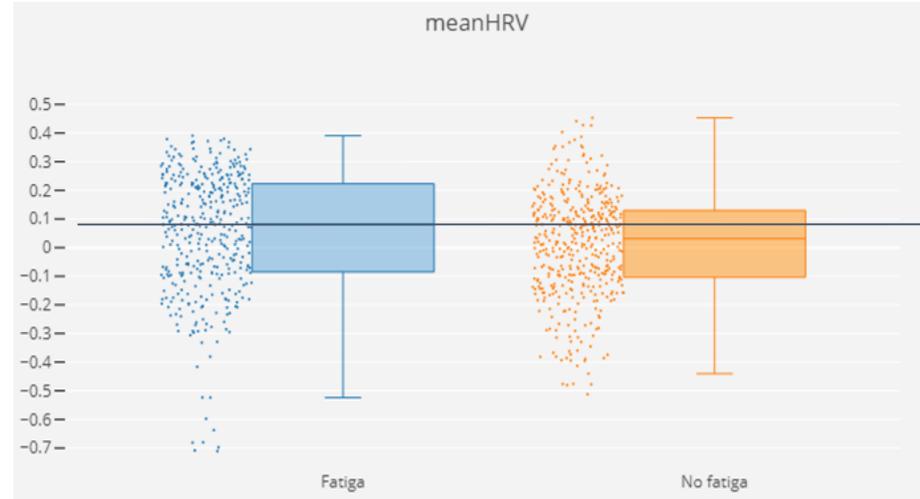
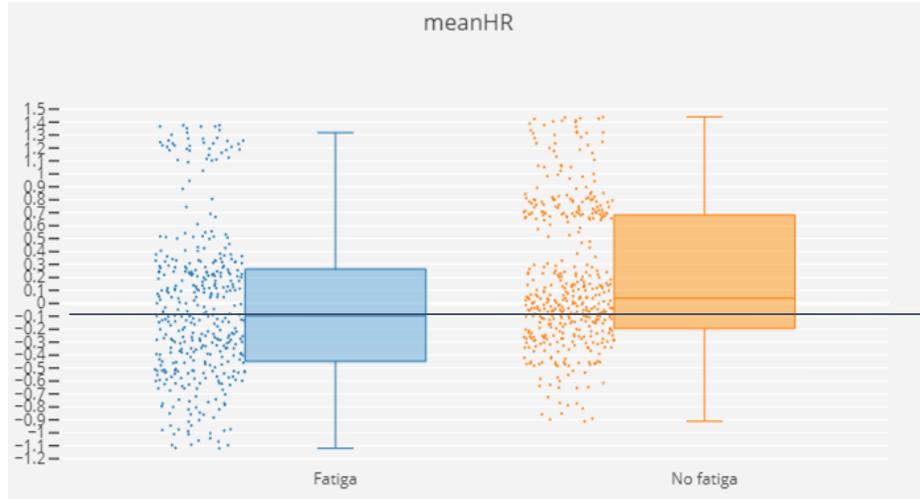


# Respaldo

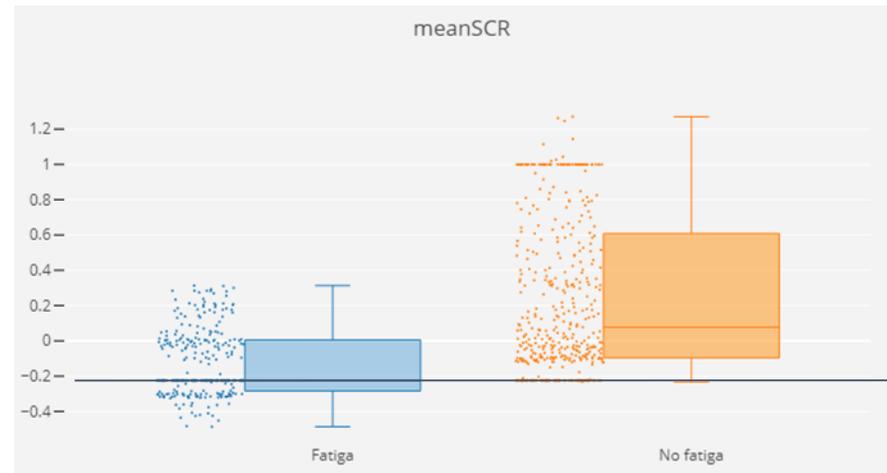
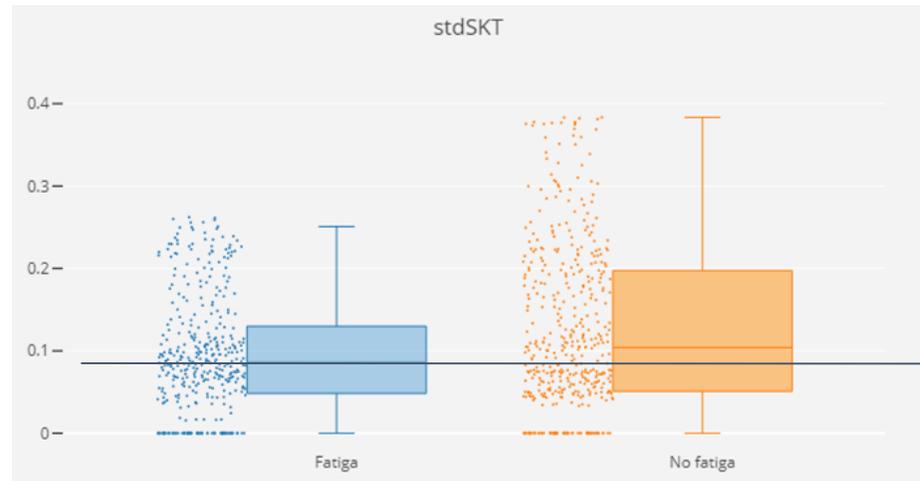
# Análisis de Tarea: Respuesta a la Hipótesis 1, Evidencia



Seminario  
Investigación e Innovación  
en Prevención de  
Accidentes de Trabajo y  
Enfermedades Profesionales



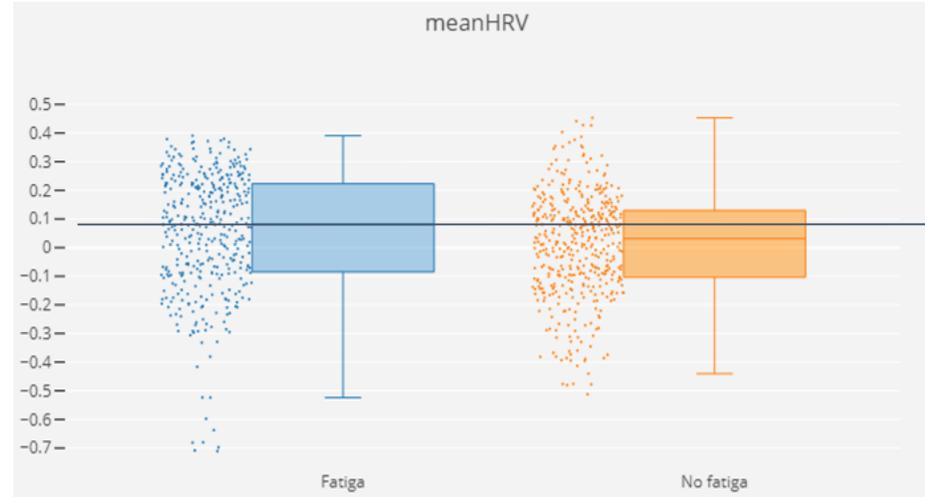
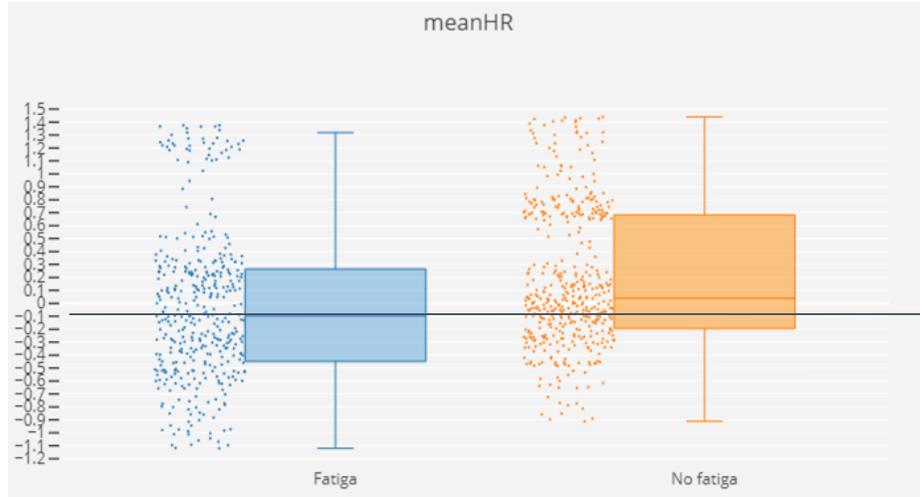
Fatiga  
No fatiga



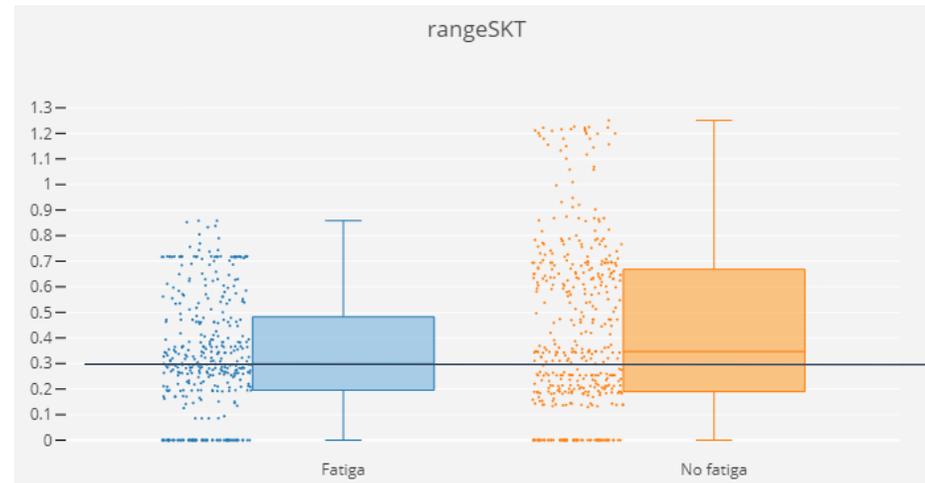
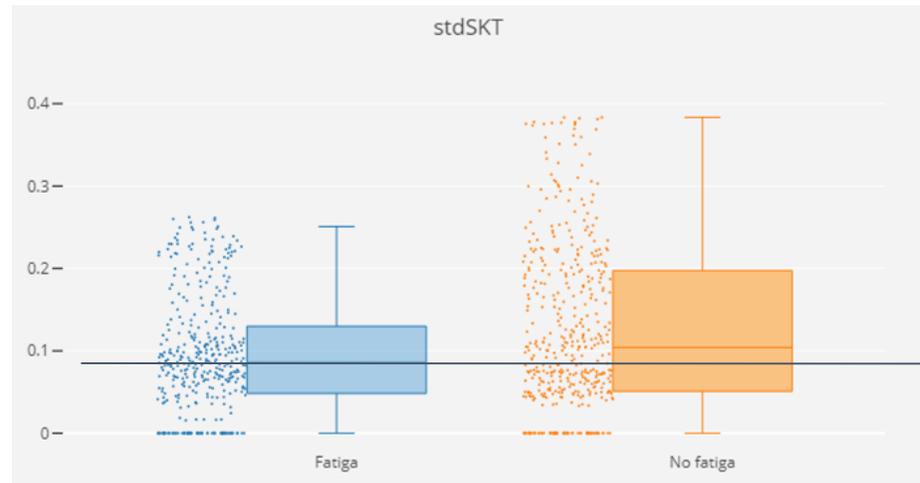
# Análisis de Tarea: Respuesta a la Hipótesis 1, Evidencia



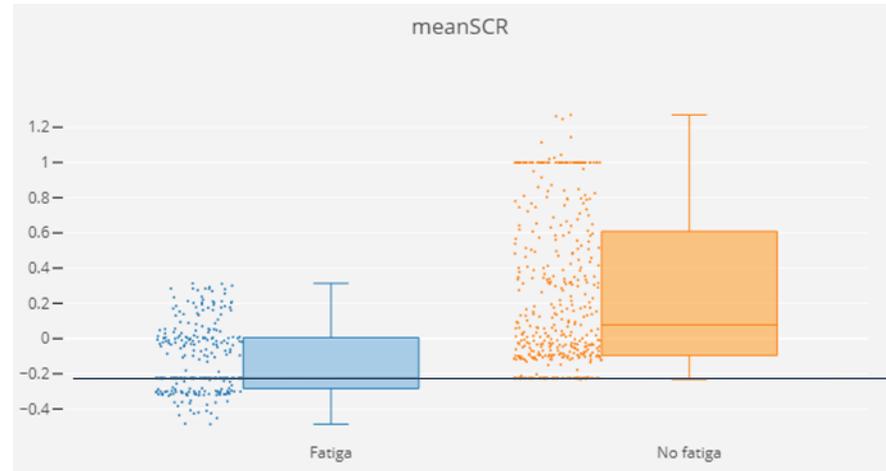
Seminario  
Investigación e Innovación  
en Prevención de  
Accidentes de Trabajo y  
Enfermedades Profesionales



Fatiga  
No fatiga



# Análisis de Tarea: Respuesta a la Hipótesis 1, Evidencia



 Fatiga  
 No fatiga

