



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de comportamiento de conductores y la generación de accidentes de tránsito

Ing. Wilson Arias Rojas MSc.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2020

Modelo de comportamiento de conductores y la generación de accidentes de tránsito

Ing. Wilson Arias Rojas MSc.

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
PhD en Ingeniería Civil

Director:

Ing. Jorge Eliécer Córdoba Maquilón MSc., PhD

Línea de Investigación:

Planeación e infraestructura para el Transporte

Grupo de Investigación:

Vías y Transporte VITRA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2020

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

A Carolle Michelle, mi amada esposa, por toda la paciencia que tuviste conmigo durante este proceso de aprendizaje.

A Sebastián Andrés, mi pequeño tiburón, quien con su inocencia de bebé me ha hecho comprender una nueva faceta de la vida, la de ser papá.

¡A mi padre, por todo el apoyo y comprensión que ha tenido conmigo desde que tengo uso de razón...infinitas gracias!

A mi hermano Carlos Alberto, por su infinita paciencia conmigo y el apoyo que me ha dado desde su segundo país, Alemania!

Y finalmente a la memoria de mi querida madre, que Dios la esté cuidando donde quiera que esté

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

A la Dirección de Tránsito de la Policía Nacional de Colombia, por la información suministrada para el inicio de esta investigación doctoral

A Colciencias, por el patrocinio de esta investigación doctoral.

A las alcaldías de los municipios de Cajicá y Sopó, por el apoyo prestado para la ejecución de pruebas.

A mi tutor, el Dr. Jorge Eliecer Córdoba Maquilón, quien más que un tutor doctoral, ha sido un amigo y un apoyo durante todo este proceso de formación.

Al Dr. José Luis Ramírez Arias, Profesor de la Universidad Militar Nueva Granada, por el apoyo prestado en el desarrollo de esta tesis doctoral, quien además de un apoyo profesional, me ha enseñado lo que significa el verdadero sentido de la amistad.

Al Profesor Gerardo Ardila Duarte, Profesor de la Universidad Militar Nueva Granada, por el apoyo prestado en el análisis estadístico de la información obtenida durante los experimentos.

A mi hermano Carlos Alberto, a quien molesté en innumerables ocasiones para hacer los contactos necesarios y las conversaciones de soporte técnico con el desarrollador del software de simulación Foerst en Alemania ¡Gracias por toda la paciencia!

A mi tío Orlando Arias López (QEPD), quien hizo las gestiones necesarias en el Club Militar y la Universidad Militar Nueva Granada, para la ejecución de pruebas.

A Daniela Rincón y Germán Sanabria, quienes fueron estudiantes míos en la Universidad de la Sabana y me prestaron todo el apoyo logístico para la movilización de equipos y ejecución de pruebas.

A mi padre William Arias López, quien siempre me acompañó y fue soporte en todo momento y en todas las pruebas realizadas en los diferentes lugares a los cuales tuvimos que ir para obtener el tamaño de la muestra poblacional.

A todas aquellas personas que no menciono, pero que fueron apoyo de una u otra manera,
¡muchas gracias!.

Resumen

Esta investigación doctoral, es el resultado del análisis del comportamiento de conductores en un escenario controlado, en un simulador de conducción, en el cual, mediante la medición de ondas cerebrales, se obtuvo la grabación de ondas cerebrales para determinar el grado de concentración al conducir y por medio del uso de redes neuronales y de inteligencia artificial, se planteó un modelo de comportamiento de los conductores al someterse a un efecto distractor mientras se conduce, el cual permite analizar los factores más relevantes que se reflejan en errores y malas prácticas al momento de conducir. En esta investigación se determinó una muestra poblacional desde los 16 hasta los 90 años, compuesta de hombres y mujeres, a partir de un universo obtenido de una base de datos de fatalidades durante 7 años, se construyó un simulador de conducción con un software para la simulación que permite diferentes escenarios de conducción. Se elaboró un programa de captura de ondas cerebrales el cual midió el grado de concentración de los participantes del experimento mientras eran sometidos al efecto distractor de envío de mensajes de *Whatsapp* mientras conducían en el escenario escogido. Posteriormente se hizo un análisis de la información obtenida por medio de redes neuronales, obteniendo los resultados del comportamiento de los conductores y errores más comunes durante el experimento, se planteó un modelo de comportamiento de conductores ante los efectos distractores

Finalmente se clasificaron conductas riesgosas de conductores al ser sometidas a un efecto distractor, observando el comportamiento de conductores mayores de 50 años, los cuales son más cautelosos ante efectos distractores, y se planteó un modelo matemático que depende del grado de concentración de usuarios y varía de acuerdo al escenario escogido por cada uno de los participantes del experimento

Palabras clave: Simulación, Machine Learning, Neurosky, comportamiento humano, conductas riesgosas.

Abstract

This doctoral research is the result of the analysis of drivers behavior in a controlled scenario, using a driving simulator, in which, by measuring brain waves, the degree of concentration was (measured when driving and through the use of networks neuronal and artificial intelligence, a model of behavior of drivers was proposed to be subjected to a distracting effect while driving, which allows analyzing the most relevant factors that are reflected in errors and bad practices at the time of driving.

In this research was determined a population sample of men and woman whose ages oscillate between 16 to 90 years, composed of men and women, from a universe obtained from a database of fatalities for 7 years. A driving simulator was built, and it was using a software for the simulation that allows different driving scenarios.

A brainwave capture program was developed in which the participants' degree of concentration, the experiment, the moment, the effect, the sending factor of the *WhatsApp* messages were measured, while it was carried out in the chosen scenario.

Subsequently, an analysis of the information was made in the neural networks, obtaining the results of the behavior of the drivers and the most common errors in the experiment, A model of behavior of the drivers was presented before the distracting effects.

Finally, risk behaviors were classified to be a factor of distraction, observing the behavior of drivers over 50, who are more cautious about the effects of distraction, and a mathematical model was proposed that depends on the degree of concentration of users and according to the scenario chosen by each one of the participants of the experiment.

Keywords: Simulation, Machine Learning, Neurosky, human behavior, risky behaviors

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVI
Introducción.....	1
Relación entre la carretera, el conductor, el vehículo y la seguridad vial.....	5
Tecnologías de información útiles para el análisis de tráfico.....	11
Capítulo 1. Modelos de Comportamiento de un conductor.....	25
1.1 Funciones cognitivas críticas para una conducción segura	32
1.1.1 Distracción del conductor.....	33
1.1.2 Tipos de distracción del conductor.....	33
Capítulo 2. Simulador de conducción.....	39
2.1 Ventajas y desventajas	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 Ventajas	40
2.1.2 Desventajas.....	41
2.1.3 Fidelidad.....	42
2.1.4 Validez de la simulación	43
2.2 Experimentos en simuladores de conducción y la distracción del conductor. ...	43
2.2.1 Teléfonos celulares.....	44
2.2.2 Elección del simulador de conducción.	Error! Bookmark not defined.
2.2.3 Dinámica de conducción.....	52
2.2.4 Generación de gráficos.....	53
Capítulo 3. Modelo de estímulos distractores. Mensajes de <i>Whatsapp</i>.	89
Capítulo 4. Adquisición del Nivel de concentración instantáneo. .	Error! Bookmark not defined.
4.1 Experimentos en simuladores de conducción y la distracción del conductor.	Error! Bookmark not defined.
4.2 Configuración inicial del experimento	Error! Bookmark not defined.
4.3 Investigaciones relacionadas con la diadema Neurosky.....	74
4.4 Protocolo experimental.....	Error! Bookmark not defined.
4.5 Programa para capturar datos con la diadema Neurosky ...	Error! Bookmark not defined.
4.5.1 Criterios de exclusión.....	82
4.6 Procedimiento del experimento	Error! Bookmark not defined.
4.6.1 Definición de las condiciones del área de conducción	76

Capítulo 5. Modelos predictivos de accidentalidad.....	Error! Bookmark not defined.
5.1 Acerca de las redes neuronales.....	Error! Bookmark not defined.
5.1.1 Ventajas de las redes neuronales	Error! Bookmark not defined.
5.1.2 Funciones de activación de las redes neuronales	Error! Bookmark not defined.
5.1.3 Problemas Linealmente Separables y Capas Neurales. .	Error! Bookmark not defined.
5.2 Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)	Error! Bookmark not defined.
5.2.1 SVM usados para la clasificación binaria de datos linealmente separables.	Error! Bookmark not defined.
5.3 Regresión logística para planteamiento del modelo de comportamiento.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.1 El concepto del ODD o el riesgo.....	98
5.3.2 La prueba exacta de Fisher.....	98
5.3.3 La prueba de Hosmer.....	99
5.4 Universo inicial a analizar	100
5.5 Tamaño de la muestra poblacional	100
5.6 Selección de Automachine Learning para el análisis de la información.....	114
5.7 Diferencias, y similitudes entre modelos estadísticos y redes neuronales...	Error! Bookmark not defined.
5.8 Análisis de datos.....	Error! Bookmark not defined.
5.9 Poda sináptica	Error! Bookmark not defined.
5.10 Análisis de la información	Error! Bookmark not defined.
5.10.1 Procedimiento para analizar la información.....	Error! Bookmark not defined.
5.10.2. Estrategias de regresión para el análisis de datos.	Error! Bookmark not defined.
5.10.3. Modelos econométricos.....	Error! Bookmark not defined.
5.10.4. Modelos econométricos de elección.	Error! Bookmark not defined.
5.10.5. Modelos obtenidos usando AutoMachine Learning.....	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.	122
Recomendaciones.....	128
Bibliografía	129
 Anexo A: Aval del comité de ética, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.....	141
Anexo B: Formatos de Asentimientos y consentimientos notificados.	145
Anexo C: Listado de errores de conducción.....	149
Anexo D: Análisis de información en Matlab	157

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Interacción entre los factores principales contribuyentes a los choques de tránsito	6
Figura 2 Diagrama de flujo de TimeGeo	10
Figura 3. Captura de datos en Waze	11
Figura 4. Marco conceptual para el análisis del comportamiento de un conductor	20
Figura 5. Modelo de simulador de conducción.....	52
Figura 6 Uso de los espejos retrovisores.....	54
Figura 7 Repeticiones y datos de la simulación.....	55
Figura 8 Simulación de conducción.....	56
Figura 9 Módulo de escenario de conducción en ciudad.....	57
Figura 10 Módulo de escenario de conducción en autopista.....	57
Figura 11 Módulo de escenario de conducción en diferentes condiciones de día y clima.....	58
Figura 12 Simulación de conducción real.....	59
Figura 13 Puntuación finalizada la conducción.....	59
Figura 14 Datos de información del motor mientras se conduce.....	61
Figura 15 Ejemplos de simulación con diferente clima	63
Figura 16 Ejemplos de simulación en vía rural y vía urbana.....	64
Figura 17 Simulador de Conducción utilizado en la investigación.....	66
Figura 18 Diadema Neurosky instalada en la cabeza de un conductor.....	69
Figura 19 Conductor de camión	70
Figura 20 Otro punto de vista de la conducción en el simulador.....	70
Figura 21 Escenario de conducción en vía urbana	71
Figura 22 Participante hombre de 82 años conduciendo en el simulador	71
Figura 23 Participante mujer de 90 años conduciendo en el simulador	72
Figura 24 Bandas de frecuencias obtenidas a partir de la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky.....	76
Figura 25 captura de datos a partir de la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG NeuroSky.....	79
Figura 26 Distribución de participantes por grupo y rango de edad	84
Figura 27 Distribución de participantes por estrato socioeconómico.....	85
Figura 28 Distribución de participantes por nivel de escolaridad	85
Figura 29 Porcentaje de concentración por género	90
Figura 30 Participantes por género.....	90
Figura 31 Concentración en porcentaje por estrato	91

Figura 32 Concentración por estrato	91
Figura 33 Concentración por nivel educativo	92
Figura 34 Concentración por porcentaje por nivel educativo	92
Figura 35 Concentración por porcentaje por rango de dad	93
Figura 36 concentración por rango de edad.....	93
Figura 37 Concentración por género por rango de edad	94
Figura 38 Errores más comunes por edad, por género	94
Figura 39 Concentración por accidente.....	95
Figura 40 Tipos de muestreo.	101
Figura 41 Distribución de porcentaje de la muestra por género	103
Figura 42 Distribución de porcentaje por estratos socioeconómicos	103
Figura 43 Distribución de porcentaje por nivel de escolaridad.....	103
Figura 44 Análisis de modelo econométrico de concentración.	105
Figura 45 Relación de porcentaje de individuos por variable que presentaron un accidente.	108
Figura 46 Regresión logística con variable concentración.....	111
Figura 47 Regresión logística con variables edad y concentración	112
Figura 48 Árbol de decisión de 10 nodos	115
Figura 49 Matriz de confusión y validación cruzada del árbol de decisión de 10 nodos	116
Figura 50 Árbol de decisión de 20 nodos	117
Figura 51 Matriz de confusión y validación cruzada del árbol de decisión de 20 nodos	118
Figura 52 Red neuronal multicapa	119
Figura 53 Número actual de accidentes contra numero predicho de accidentes	120
Figura 54 Importancia de variables de la red neuronal.....	120

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Factores humanos que afectan el comportamiento del conductor y la seguridad	31
Tabla 2 Fuentes de distracción al conductor por categoría.....	35
Tabla 3. Riesgos percibidos asociados con la distracción del conductor	36
Tabla 4 Listados de errores de conducción obtenidos en el experimento	68
Tabla 5 Comparativo de estudios de simuladores de conducción y uso de celulares.	73
Tabla 6 Banda de Frecuencias de Neurosky Think Gear EEG	75
Tabla 7 Distribución de participantes por grupo y rango de edad	84
Tabla 8 Distribución de participantes por estrato socioeconómico.....	84
Tabla 9 Distribución de participantes por nivel de escolaridad.....	85
Tabla 10 Ventajas y desventajas de los tipos de muestreo aleatorio.	102
Tabla 11 Parte descriptiva de accidentes por variables a analizar.....	107
Tabla 12 Stepwise Forward: Probabilidad de Accidentalidad.....	109
Tabla 13 Valores para el modelo de concentración.	110
Tabla 14 Valores para el modelo de edad y concentración	111
Tabla 15 Función de Concentración Instantánea.....	112
Tabla 16 16avos de análisis multiresolución.....	113
Tabla 17 Valores para el modelo de análisis de multiresolución	113
Tabla 18 Modelos obtenidos.....	121

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Km/h	Kilómetros por hora	Km/h	
T	Tiempo	s	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
φ	Regla de propagación de la red neuronal		
α	Nivel de significación estadístico		
\bar{x}	Media aritmética		

Subíndices

Subíndice	Término
X_i	Entrada a la red neuronal
W_{ji}	Pesos sinápticos

Subíndice Término

Abreviaturas**Abreviatura Término**

<i>DITRA</i>	Dirección de Tránsito, Policía Nacional de Colombia
<i>RNA</i>	Red neuronal artificial
<i>OMS</i>	Organización Mundial de la Salud
<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>NCSA</i>	National Center for Statistics and Analysis
<i>SVM</i>	Support Vector Machine
<i>SDK</i>	Software Development Kit
<i>GmbH</i>	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
<i>EEG</i>	Electroencefalograma
<i>TDAA</i>	Transtorno por déficit de atención de hiperactividad.
<i>FFT</i>	Transformada rápida de Fourier

Introducción

El estudio de la frecuencia y causalidad de las colisiones de tránsito en las vías públicas es un tema prominente debido a su impacto y costo a la sociedad. Cada año, de acuerdo con las estadísticas del extinto Fondo de Prevención Vial de Colombia, en un promedio de 2 minutos y medio ocurre un accidente de tránsito, cada 10 minutos hay un herido y cada hora hay una víctima fatal, debido a la pobre seguridad vial que se presenta en el país. Los grupos de la población especialmente vulnerables son: los jóvenes de 15 a 30 años, los peatones, los ciclistas y en los últimos 5 años, los motociclistas. De acuerdo con datos de la Agencia Nacional de Seguridad Vial, (2019) el 52% del total de los fallecidos por accidentes de tránsito son conductores de motocicleta, 24.6% peatones, usuarios de vehículos un 12.2% y ciclistas un 6.7%.

Es por este motivo, que se investiga cuáles son las causas generadoras de accidentes de tránsito, concentrándose en el área de los efectos distractores y más específicamente en el uso de la aplicación para celulares de mensajería instantánea *Whatsapp*.

El exceso de velocidad es la principal causa en la accidentalidad vial. El 89% de los accidentes de tránsito ocurren por falla humana, el 11% restante, ocurren por problemas mecánicos, factores climáticos y defectos en la carretera entre otros. (Arias, W. Colucci B. 2006). La mayoría de los accidentes de conductores, ocurren en un promedio de 5 minutos antes de llegar a su destino, ya que el conductor se relaja y por ende, disminuye la atención en la conducción del vehículo. (Arias, W., Colucci B. 2006) Si embargo, los autores no tuvieron en cuenta que el factor carretera contribuye en el 28 al 34% y el factor vehículo contribuye en el 8 al 12% (Rumar, 1985 y Johnston, 2006).

El fuerte aumento en el precio de la gasolina, que puede tener un efecto reductor en los viajes durante ciertos períodos de tiempo, aumentando o disminuyendo la accidentalidad. El efecto de una vigilancia policíaca intensiva resulta en una modificación fugaz en el comportamiento de los conductores en la carretera debido al aumento en la percepción del

riesgo de ser multado. Shinar y Stiebel (1986) y Benekahal *et al.* (1992) demostraron el efecto reductor fugaz en las velocidades de los conductores debido a un aumento en la presencia policiaca en la carretera. Vaa (1997) demostró que el efecto de una vigilancia policiaca intensiva en un segmento de carretera tiene una duración máxima de 8 meses en las velocidades de los conductores.

En términos de las muertes asociadas a la velocidad, el 54 % de estos choques ocurrieron en segmentos de carretera con una velocidad límite rotulada de 56 Km/h o menos (NCSA, 2006). Adicionalmente, AASHTO (2004) recomienda que la velocidad de diseño de una carretera sea consistente con la velocidad que los usuarios esperan con base en las características geométricas de la carretera. Cabe preguntarse cuál es la relación existente entre la velocidad de diseño, los componentes geométricos y la velocidad límite rotulada en estos segmentos que pueda ser un factor contribuyente a estos choques fatales. Es necesario analizar cuál es la relación entre el diseño geométrico de la carretera y la percepción del riesgo de choque de los conductores en estos segmentos.

Para Ferrer *et al.*, (2013) no coinciden las cifras de accidentes y fatalidades que se manejan en Colombia por parte de la Policía Nacional, el Dane, y el Instituto de Medicina Legal

La severidad de un accidente puede estar relacionada con cambios repentinos en la velocidad límite de un segmento de carretera que podrían pasar desapercibidos por los conductores si la geometría o las características generales del segmento no varían considerablemente. Esta situación puede ser más definitiva en un segmento de carretera donde la velocidad límite no es acorde con las expectativas de los conductores de acuerdo a las características del segmento. Además, se deben tener en cuenta factores como la educación, la ingeniería, el manejo de incidentes en las carreteras y la ejecución de planes en las mismas para analizar las causas por las cuales ocurren accidentes sobre el corredor vial seleccionado.

Se puede considerar que un conductor que esté en la zona urbana, donde la velocidad máxima permitida es de 60 Km/h, y cambia a una zona rural donde aumenta la velocidad a 100 Km/h, y se encuentra con una zona de construcción temporal, donde se debe disminuir la velocidad de 30 km/h, puede no reaccionar adecuadamente a este cambio y perder el control del vehículo ocasionando un accidente, ya sean de índole severo o fatal.

Las fatalidades que ocurren en las carreteras por la ausencia o falta de mantenimiento de los dispositivos de control de tráfico y de seguridad instalados, como la demarcación inadecuada, la señalización y demarcado en las vías, posiblemente sean la causa del aumento del número de los accidentes fatales que tienen un muy alto costo para la sociedad y para la economía de un país.

El fuerte aumento en el precio de la gasolina puede tener un efecto reductor en los viajes durante ciertos períodos de tiempo, aumentando o disminuyendo la accidentalidad. El efecto de una vigilancia policiaca intensiva resulta en una modificación fugaz en el comportamiento de los conductores en la carretera debido al aumento en la percepción del riesgo de ser multado. Shinar y Stiebel (1986) y Benekohal *et al.* (1992) demostraron el efecto reductor fugaz en las velocidades de los conductores debido a un aumento en la presencia policiaca en la carretera. Vaa (1997) demostró que el efecto de una vigilancia policiaca intensiva en un segmento de carretera tiene una duración máxima de 8 meses en las velocidades de los conductores.

En términos de las muertes asociadas a la velocidad, el 54 por ciento de estos choques ocurrieron en segmentos de carretera con una velocidad límite rotulada de 56 Km/h o menos (NCSA, 2006). AASHTO (2004) recomienda que la velocidad de diseño de una carretera sea consistente con la velocidad que los usuarios esperan con base en las características geométricas de la carretera. Cabe preguntarse cuál es la relación existente entre la velocidad de diseño, los componentes geométricos y la velocidad límite rotulada en estos segmentos que pueda ser un factor contribuyente a estos choques fatales. Es necesario analizar cuál es la relación entre el diseño geométrico de la carretera y la percepción del riesgo de choque de los conductores en estos segmentos.

Una investigación realizada en el Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico demostró que el 70% de los choques con peatones ocurren en zonas urbanas, el 98.5% ocurren en lugares fuera de las intersecciones y el 73% ocurre en segmentos de carretera rectos y llanos (Alicea, 2004). Este trabajo de investigación presentó varias recomendaciones a corto, mediano y largo plazo para mitigar el problema de seguridad de los peatones en Puerto Rico. Algunas de estas medidas son el establecimiento de estrategias de educación, instalación de barreras a peatones, instalación de señales de tránsito para peatones en selectos segmentos de carretera, enmiendas a la ley de tránsito

y el uso de técnicas de ingeniería ("*traffic calming*") para reducir las velocidades de los vehículos.

"En tasas comparativas por población, la Unión Europea alcanzó en 2014 la cifra más baja hasta el momento en cualquier región del mundo de 51 muertes por millón de habitantes, 12 menos que en 2010. Los países con tasas más bajas son Suecia, Holanda, Reino Unido y Malta, por debajo de los 30 muertos por millón de habitantes. Mientras otros como Lituania, Bulgaria, Rumanía y Latvia superan los 90 muertos por millón de habitantes" (Alonso 2016). En Colombia esta tasa es de 121 muertos por millón de habitantes. (WHO, 2015)

La tasa de choques y la tasa de mortalidad son indicadores útiles para conocer la escala del problema y para realizar comparaciones en seguridad vial. La frecuencia de choques está asociada al volumen de tráfico en la carretera por lo que cualquier evaluación estaría indebidamente influenciada por la cantidad de vehículos en la carretera. La tasa de choques o de mortalidad por vehículo-Km recorridos (VKR) normaliza la frecuencia de los eventos por su exposición al riesgo de choque o muerte, respectivamente.

En varios países, se han establecido Sistemas de Gerencia en Seguridad Vial (*Safety Management Systems* o SMS por sus siglas en inglés) que implantan procesos sistemáticos e integrados en la planificación, el diseño y la construcción de carreteras con el propósito de reducir la cantidad de muertes. Además, estos sistemas incorporan procesos integrados en el manejo de datos de choques, la evaluación y análisis de los problemas de seguridad y la administración de un sistema de carreteras, entre otros procesos, que están enfocados en cuatro áreas esenciales: la educación y entrenamiento al conductor y otros usuarios del sistema de carretera; la ingeniería, el cumplimiento de las leyes ("*enforcement*") , y los servicios médicos de emergencia (en inglés este concepto se conoce las Cuatro E's: "*Engineering*", "*Education*", "*Enforcement*" y "*Emergency Services*").

Según la Real Academia de la Lengua Española, una fatalidad se define como un hecho basado precisamente en su imprevisibilidad, como un suceso o circunstancia desgraciada; por otra parte, un accidente de tránsito se define como un evento ocasionado de manera involuntaria, que involucra uno o más vehículos y/o peatones, produciendo congestión en la vía por donde transitan los actores involucrados.

Según el decreto 056 de 2015 del gobierno de Colombia un accidente es un suceso ocurrido dentro del territorio nacional, en el que se cause daño en la integridad física o mental de una o varias personas, como consecuencia del uso de la vía por al menos un vehículo automotor.

La OMS define un accidente como un “acontecimiento fortuito, generalmente desgraciado o dañino, independientemente de la voluntad humana, provocado por una fuerza exterior que actúa rápidamente y que se manifiesta por la aparición de lesiones orgánicas o trastornos mentales”

Las fatalidades que ocurren en las carreteras por la ausencia o falta de mantenimiento de los dispositivos de control de tráfico y de seguridad instalados, como la demarcación inadecuada, la señalización y demarcado en las vías, entre otras, son las causas del aumento del número de los accidentes fatales que tienen un muy alto costo para la sociedad y para la economía de un país.

Relación entre la carretera, el conductor, el vehículo y la seguridad vial

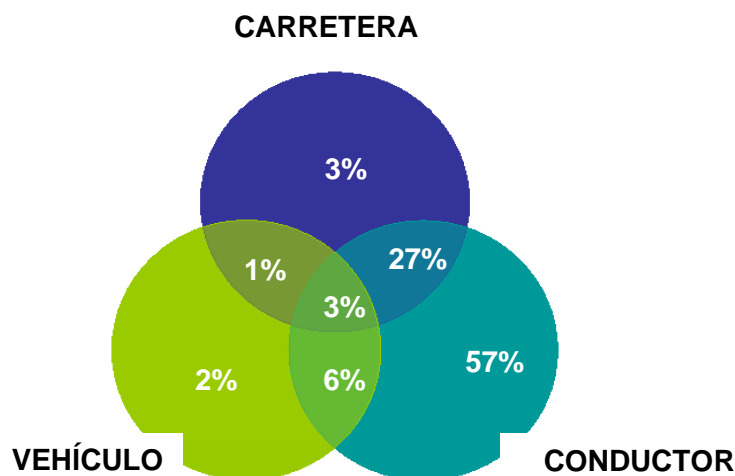
La práctica histórica en la investigación de los choques de tránsito consiste en asignar a la policía las tareas de recolección de los datos básicos de los choques como parte de sus funciones de hacer cumplir las leyes (Johnston, 2006). El propósito primordial de estas investigaciones policíacas es determinar cuál de los conductores involucrados en el choque tiene la “culpa” y de verificar cuáles leyes han sido violentadas para efectos administrativos, judiciales o de seguro. En la mayoría de los casos, el policía a cargo de la recolección de los datos del choque no tiene el conocimiento técnico, el mandato o la oportunidad de atribuir “culpas” a otros factores externos al factor humano.

Las investigaciones en seguridad vial han ido modificándose para proveer un análisis científico y sistemático en la identificación y análisis de las causas y los factores contribuyentes a la ocurrencia de los choques que lo aparten de la práctica de simplemente atribuir toda la culpa a fallas o errores humanos. Johnston y Shinar (2006) concluyeron en estudios separados que los choques de tránsito son la consecuencia de una cadena de eventos y circunstancias, y que de poder removerse algún elemento de la cadena podría conllevar a que el evento no hubiese ocurrido. Los choques de tránsito son eventos causados por múltiples y diferentes factores donde interactúan principalmente el diseño

geométrico y el entorno de la carretera; el comportamiento de los conductores; las características de los vehículos; el volumen de tráfico, y las condiciones del tiempo y de la carretera. La relación entre estos factores y los choques de tránsito es sumamente compleja y requiere de un proceso metódico de análisis y evaluación debidamente estructurado.

En términos generales, estudios han demostrado que el factor humano es la causa de los choques en 57 a 67 por ciento de los eventos, mientras que el factor carretera es el responsable en 3 al 4 por ciento y el factor vehículo es el responsable en 2 al 4 por ciento. Cuando se considera la interacción entre los tres factores, el factor humano es uno de los factores contribuyentes a la colisión en el 93 al 95 por ciento de los sucesos, mientras que el factor carretera contribuye en el 28 al 34 por ciento y el factor vehículo contribuye en el 8 al 12 por ciento (Rumar, 1985 y Johnston, 2006). La Figura 1 presenta un diagrama de Venn con los resultados de la investigación de Rumar mostrando la participación de cada factor contribuyente a los choques de tránsito.

Figura 1. Interacción entre los factores principales contribuyentes a los choques de tránsito



Fuente: Figueroa et al, 2006

Los conductores, en promedio, pueden percibir el riesgo real de choque en la carretera mediante las características de la carretera, y por ende, ajustar su conducta utilizando esa percepción. La relación entre la selección de velocidades y la percepción de riesgo de choque fue demostrada por Figueroa *et al.* (2005). El estudio de percepción de riesgo mostró que los conductores, aun sin conocer información acerca de la cantidad de choques

en un segmento de carretera, perciben, en promedio, menor riesgo en segmentos de carretera con tasas menores de choque. El riesgo real de choque (representado con la tasa de choques) interactúa recíprocamente con la percepción de riesgo de los conductores cambiando su comportamiento en la carretera demostrando que, al aumentar la percepción de riesgo de choque en la carretera, los conductores compensan reduciendo sus velocidades y estando más atentos a las condiciones de la carretera.

Figuerola *et al.* (2005) usaron una muestra de conductores autorizados del estado de Indiana para identificar las características de los conductores que afectan su percepción del riesgo de choque en segmentos de carretera de cuatro carriles. Se encontró que las mujeres y las personas con menor exposición a las condiciones de la carretera (e.g., menos millas recorridas anualmente) tienden a percibir mayor riesgo en los mismos segmentos que los otros conductores en la muestra. Por el contrario, las personas con menos años conduciendo tienden a percibir menor riesgo de choque en los mismos segmentos que los otros conductores.

Las mujeres tienden a percibir mayor riesgo que sus contrapartes varones debido a que los riesgos son introducidos social y culturalmente a los dos géneros de manera diferente, y por consecuencia, los hombres y mujeres están expuestos a riesgos diferentes, perciben los riesgos diferentemente y manejan los riesgos de manera diferente (Gustafson, 1998). DeJoy (1992) concluye que los jóvenes varones y mujeres no poseen diferencias en su percepción general de la carretera, pero que difieren en cuanto a la seriedad y el nivel de riesgo asociado a los patrones de conducta arriesgada al conducir.

La experiencia del conductor es un factor influyente en la percepción de riesgo de choque. Algunos investigadores entienden que la experiencia es un factor más importante que la edad del conductor (Jonah, 1986; DeJoy, 1992). Los conductores inexpertos podrían no identificar apropiadamente los peligros en la carretera o podrían reaccionar inadecuadamente al identificar un peligro en la misma.

Figuerola estableció las relaciones entre las características geométricas de carreteras de cuatro carriles, las velocidades libres de los conductores y la tasa de choques usando una muestra de segmentos de carretera del estado de Indiana. Factores como la densidad de intersecciones y de los puntos de acceso en un segmento de carretera, la velocidad límite rotulada, el ancho de la vía de rodaje, la distancia desde los carriles hasta los objetos fijos a la orilla de la carretera, la curvatura horizontal y la distancia de la visibilidad fueron

identificados como elementos geométricos de la carretera que tienen un efecto significativo en la selección de velocidades libres de los conductores y la tasa de choques en la carretera.(Figueroa ,2005)

Hauer (1990) sugiere tres estrategias de ingeniería para mejorar la seguridad en las carreteras: 1) reducir la oportunidad de que ocurra un choque al controlar los puntos de conflicto entre vehículos (e.g., puntos de acceso en un segmento de carretera o en una intersección), 2) reducir la probabilidad de que ocurra un choque mediante el diseño y la incorporación adecuada de aditamentos de control de tráfico en la carretera, y 3) reducir la transferencia de energía cuando un choque ocurre usando aditamentos de amortiguamiento de choques en la carretera para mitigar impactos con objetos rígidos.

Como se mencionó anteriormente, la importancia, las causas y las consecuencias de los problemas del transporte urbano, han generado un interés para estudiar y desarrollar nuevas técnicas y estrategias de control, que se puedan adaptar y solucionar diferentes tipos de conflictos en el tráfico. A continuación, se exponen los últimos estudios relacionados en el tema.

Para analizar el flujo de tráfico, Zamith *et al.*, (2015), crearon un modelo estocástico autómatas celular basado en la función PDF Beta, (*Probability Density Function*, por sus siglas en inglés) con el cual simulaban la predicción del comportamiento de los conductores. Inicialmente dividieron el camino en celdas discretas correspondientes a 1,5 m. Para representar la diversidad de vehículos se utilizaron el número de celdas ocupadas por ellos. Cada vehículo ocupaba en promedio un total de cinco celdas y definieron el movimiento de cada vehículo con un conjunto de reglas de actualización simple

Para representar las características de los tipos de vehículos, se definió como métrica que 5 celdas ocupadas representan un vehículo estándar; La longitud de cada celda es de 1.5 m. Esta discretización hace que el modelo sea cómodo para conducir, permitiendo al conductor asumir diferentes velocidades. Cada celda es ocupada por un vehículo. La vía es considerada para tener unas condiciones de límite periódicas, como lo es la posición X , que es la misma posición $X+L$, siendo L la longitud total del circuito. Se definen las variables de velocidad, posición en el espacio, el tiempo y la máxima velocidad permitida en el modelo.

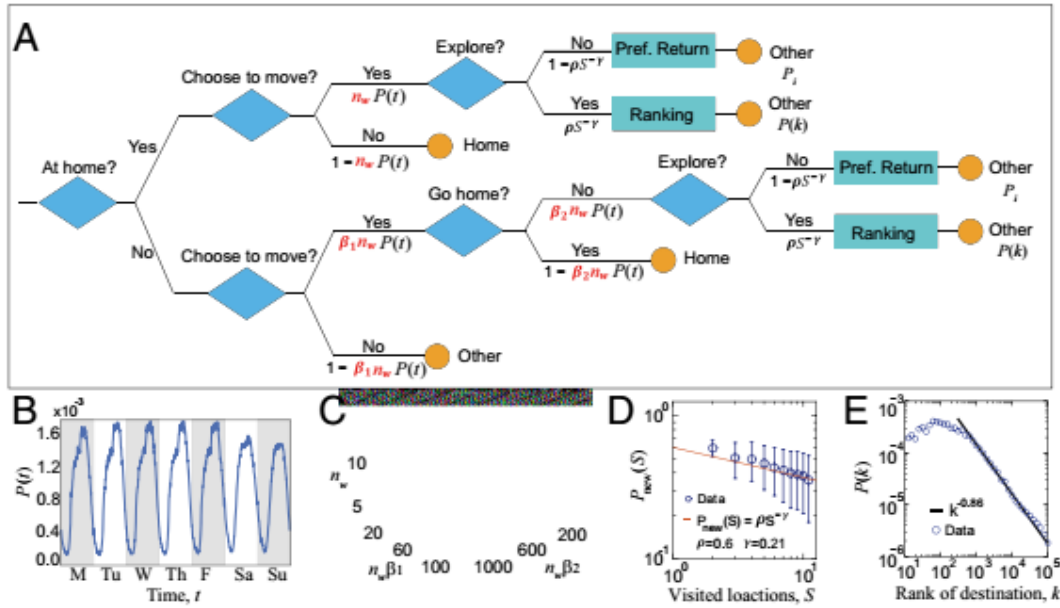
El modelo incluyó dos etapas de análisis para determinar perfiles del comportamiento de los conductores de una manera simple. En una primera fase se consideró la expectativa de movimiento de los conductores frente a cada conductor. Segundo, se definió como un vehículo específico decide moverse, teniendo en cuenta la configuración del tráfico. El modelo usó las reglas estocásticas para los dos análisis y analizó el comportamiento de tres conductores, ajustando los parámetros de la distribución beta para cada uno de ellos.

Los autores demostraron que el modelo PDF Beta, y las opciones basadas en el proceso de rechazo de Monte Carlo, es el más eficiente para modelar los comportamientos e inferir la expectativa del movimiento de los vehículos que se encuentran delante, así como definir, cómo cada automóvil decide moverse considerando la configuración del tráfico. Finalmente, el modelado del comportamiento de los conductores permitió captar el efecto de la dinámica del tráfico para evaluar las características más importantes de los flujos de tráfico

En todas las pruebas realizadas, el modelo fue capaz de reproducir una variedad de fases de flujo, mostrando resultados compatibles con los datos de medición. Con base en los resultados obtenidos, el modelo presentado es robusto, flexible y capaz de simular situaciones de tráfico heterogéneo más complejas.

Así mismo, otro método para evaluar el dinamismo del tráfico heterogéneo, Jiang *et al.* (2016) demostraron que los modelos de movilidad urbana establecidos a escala dependen de encuestas de viaje detalladas pero costosas para su calibración. Los autores presentaron un modelo mecanicista llamado *TimeGeo*, que genera efectivamente, patrones de movilidad urbana con resolución de 10 minutos y cientos de metros. Se une la inferencia de actividad del hogar, el trabajo con el modelado de actividades flexibles en espacio y tiempo. Las opciones temporales son capturadas sólo en tres características: la visita semanal en el hogar, la tasa de permanencia y la tasa de permanencia constante: estos datos combinados generan para cada individuo: 1. Duración de la estancia de las actividades, 2. Lugares visitados por día y 3. Las redes de movilidad diaria. Estos parámetros muestran como los individuos se desvían del ritmo circadiano de la población y genera un amplio espectro de comportamientos de movilidad observados empíricamente, basados en la señal de celular de 1.92 millones de usuarios anónimos de teléfonos celulares durante 6 semanas en el área de Boston. La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de TimeGeo.

Figura 2 Diagrama de flujo de TimeGeo



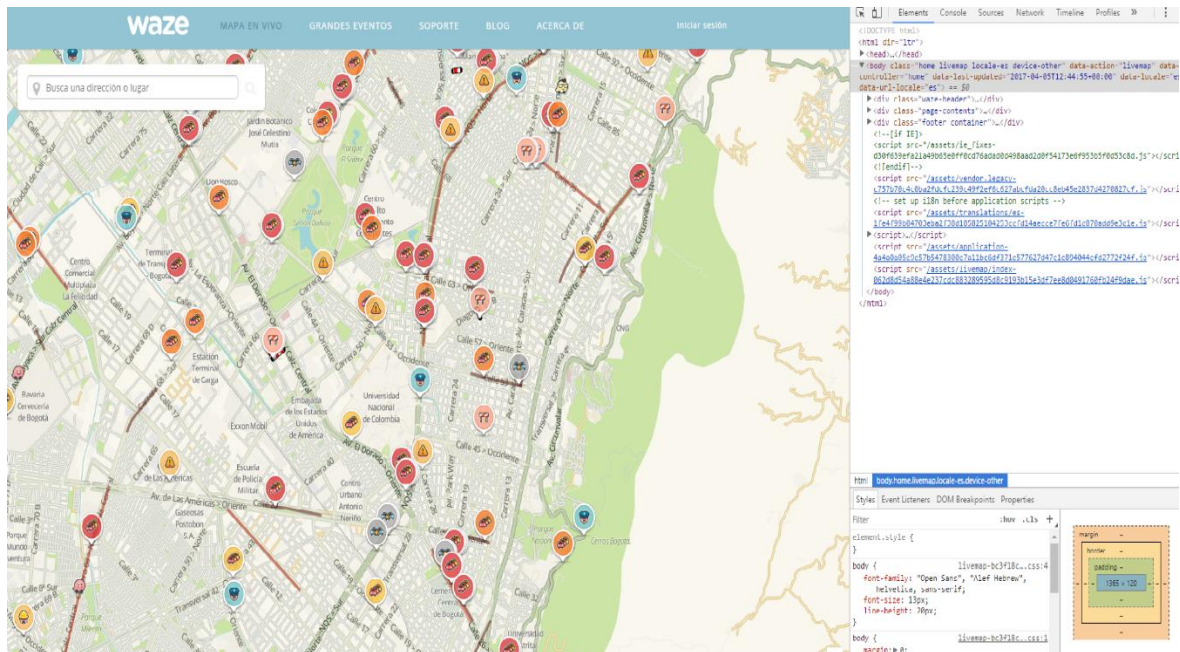
Fuente: Jiang et al., (2016)

Para simular las características de la movilidad, TimeGeo recopiló la información directamente de los usuarios de celulares, y luego se generaron trayectorias reales individuales diarias sobre un largo periodo en una escala urbana. Este modelo finalmente permitió tener en cuenta la influencia de la estructura espacial específica de la región sobre las distancias de viaje, lo cual permitió realizar pruebas de escenarios cómo el cambio del uso del suelo en una ciudad afectaría el comportamiento de desplazamiento y flujos de origen y destino a nivel macroscópico. El autor recomienda realizar otros estudios con más datos de mayor frecuencia y durante periodos más largos, para poder aprender de las variaciones individuales a través de grupos de población con diferente demografía y estilos de vida.

Finalmente, Jiang et al., (2016) utilizaron técnicas conocidas como minería de datos y *Big Data* a partir de la información obtenida en los modelos existentes. Se define minería de datos como el conjunto de tecnologías y aplicaciones que permiten recopilar, almacenar, analizar y tener acceso a datos, de tal manera que los usuarios que requieran de dicha información pueden tomar mejores decisiones.

Los modelos enunciados anteriormente, pueden ser complementados con los reportes de tráfico manifestados por los conductores usando redes sociales o aplicaciones móviles tipo *waze*. A partir de estas nuevas tecnologías se obtiene información para el análisis de tráfico. La Figura 3 muestra el funcionamiento de modelos usando *Big Data*, como Waze.

Figura 3. Captura de datos en Waze



Fuente: Waze live (2017)

Tecnologías de información útiles para el análisis de tráfico

Para obtener datos más confiables, respecto a unas variables que se encuentran almacenada en bases de datos, es necesario contar con herramientas como lo son la minería de datos, a través de aplicaciones para teléfonos inteligentes. Jacobson *et al.*, (2012), definen una API (*Application Programming Interface* por sus siglas en inglés) o interfaz de programación de aplicaciones, como un código o conjunto de especificaciones en una API, donde las aplicaciones pueden seguir para comunicarse entre ellas: sirviendo de interfaz entre programas diferentes de la misma manera en que la interfaz de usuario facilita la interacción humano-software.

Las API pueden servir para comunicarse con el sistema operativo (WinAPI), con bases de datos (DBMS) o con protocolos de comunicaciones (Jabber/XMPP). En los últimos años, se han sumado múltiples redes sociales (*Twitter, Facebook, Youtube, LinkedIn*, etc) y otras plataformas online (*Google Maps, WordPress*), lo que ha convertido el social media marketing en algo más sencillo, más rastreable y, por tanto, más rentable.

Las API son valiosas, ante todo, porque permiten hacer uso de funciones ya existentes en otro software (o de la infraestructura ya existente en otras plataformas) y cuyo funcionamiento ya ha sido validado. En el caso de herramientas privadas (es decir, que no sean de código abierto), las API son un modo de hacer saber a los programadores de otras aplicaciones cómo incorporar una funcionalidad concreta sin por ello tener que proporcionar información acerca de cómo se realiza internamente el proceso.

A partir de estas aplicaciones es posible obtener información en tiempo real, del comportamiento de los conductores y del flujo de tráfico heterogéneo de una zona geográfica, a partir de los comentarios de los usuarios de las vías, los cuales no son sesgados y expresan en tiempo real, las situaciones que se presentan en un corredor vial visto desde su perspectiva.

Las API son herramientas muy valiosas para obtener información a gran escala. Usando *Big Data*, Wu *et al.*, (2014) desarrollaron un modelo conocido como HACE (***heterogeneous, autonomous, control, and seeks***, por sus siglas en inglés), el cual caracteriza las propiedades de altos volúmenes de información, y su procesamiento desde la perspectiva de la minería de datos, incluyendo la demanda de las fuentes de información, el análisis, el interés de los usuarios y las condiciones de seguridad y privacidad.

Análogamente, Fire *et al.*, (2012), analizaron las oportunidades del uso de minería de datos en redes geosociales, las cuales tienen la habilidad de asociar contenido con localización geográfica, para analizar problemas de tráfico y la seguridad vial. Este trabajo se desarrolló con una fuente de información basada en las redes sociales, tales como “*Waze*”, la cual basada en la velocidad en que se conduce, analiza en tiempo real la mejor ruta para conducir. Los usuarios pueden reportar accidentes, congestión vehicular y unidades policiales.

El análisis de redes de transporte a partir de la información obtenida de teléfonos celulares, fue creada por el Instituto Israelí de Modelación de Planeación de Transporte. En esta red, se observan los flujos de tráfico por hora y los tiempos en viajes con congestión y se usan modelos de asignación de tránsito. Para determinar la topología de una red de vías y poder estimar matrices origen-destino. Usando la información obtenida por *Waze*, es posible obtener una calidad muy alta en los flujos y tiempos de viaje y poder calibrar y/o validar modelos de tráfico de tipo heterogéneo asignados. Esta aplicación proporciona valiosa información que puede ayudar en los estudios de transporte. Por otro lado, Fire *et al.*, (2012), mostraron que los informes de los usuarios de *Waze* pueden exponer los lugares con mayor accidentalidad y la falta de cobertura policial.

De igual manera, Georgiou *et al.*, (2015), analizaron con minería de datos las reacciones obtenidas por redes sociales en línea, las cuales ofrecen una rápida y económica manera para entender cómo se comportan los conductores. En ese estudio, analizaron la reacción de los pasajeros de automóviles en *Twitter* mientras se encontraban en obstrucciones vehiculares. Se determinó que el estado de ánimo de las personas puede ser un factor adicional, que lleva a las fluctuaciones de las reacciones observadas en las redes sociales. Este hallazgo puede ser importante para aplicaciones de detección de factores externos en flujos de tráfico heterogéneo.

Los autores propusieron un modelo de estimación de congestión de tráfico que usa el volumen de mensajes y quejas en la red social *Twitter* con el cual se puede estimar con mayor exactitud, la gravedad de las zonas con alta congestión vehicular y comparar los resultados con diferentes líneas base. Se realizaron estudios estadísticos y la primera observación se basó en los datos de volumen de tráfico, mostrando un claro aumento al final del día. También, para cada día de la semana, el tráfico de la mañana y de medio día, con menor fluctuación en la noche. En la segunda observación se notó el incremento del volumen de tráfico durante los jueves y viernes.

Con los datos obtenidos se planteó un modelo lineal tipo Naive, para evaluar el aumento del flujo de tráfico y el comportamiento de los conductores, en la mañana, medio día y en la noche. Este modelo logró una mejora del 38% de error absoluto y más del 45% de mejora en el error relativo en las observaciones. Estos hallazgos fueron soportados con datos suministrados por el Departamento de Transporte de California y *Twitter*, por un período de 6 meses.

Por otro lado, Khoo y Asitha (2016), estudiaron el uso de los teléfonos inteligentes y los mecanismos de difusión de información del tráfico. El desarrollo de *apps* relacionadas al tema permite obtener información actualizada a los conductores a partir de imágenes capturadas por circuitos cerrados de televisión. Esto facilita a los conductores la planificación de los viajes con anterioridad para evitar la congestión, y las autoridades competentes pueden manejar la demanda de viajes de manera más eficiente.

Se estableció que los conductores son más sensibles a los cambios en la densidad de la velocidad y el flujo heterogéneo al percibir los niveles de congestión de tráfico. Esta relación explica el tipo de cambio en los planes de viaje bajo diferentes condiciones de tráfico. Los conductores sólo perciben tres niveles de congestión y tienden a cambiar la hora de salida de viajes donde se elige el nivel de congestión percibido como medio, mientras que la probabilidad de cambiar de ruta se incrementa cuando aumenta el nivel de congestión. Este es el caso de herramientas como *Google Maps* o *Waze*, la cuales suministran información del flujo de tráfico en tiempo real.

Aplicando el uso de las *apps*, Gu *et al.*, (2016), demuestran su eficiencia de uso en las carreteras de Filadelfia y áreas metropolitanas de Pensilvania, para la detección de incidentes de tráfico tradicionales es a menudo limitada por la escasa cobertura de sensores y el sistema de respuesta de accidentes para responder a una emergencia, siendo esta una labor intensiva. Con la minería de datos obtenidos a través de *tweets* para extraer información de incidentes en autopistas y otras vías son una alternativa eficiente y rentable como fuente de datos existentes. Los autores presentaron una metodología para rastrear, procesar y filtrar los *tweets* que son accesibles por el público de forma gratuita.

Estos *tweets* se obtienen usando una API (*Application Programming Interface*, por sus siglas en ingles) en tiempo real. Luego, este tipo de información de texto es mapeada y georreferenciada. Esta información es mayor los fines de semana que entre días laborales y las personas tienden a reportar incidentes con mayor frecuencia de día que de noche, especialmente en las horas pico; adicionalmente, los tuits son más propensos a reportar incidentes cerca del centro de una ciudad y decae significativamente el volumen de información en la periferia.

A partir de situaciones de tráfico que manifiestan los conductores por medio de las *apps*, se puede establecer patrones de comportamiento durante los trayectos recorridos. Esta información se puede reforzar aportando la captura de información y validar estudios como

el elaborado por Af Wåhlberg (2012), quien realizó una investigación acerca de los cambios en el comportamiento cuando un conductor acelera su vehículo, a través del tiempo, para determinar si los conductores aprenden de las experiencias cuando tienen colisiones.

En las medidas repetitivas de cambio de velocidad, el comportamiento de conductores de buses se comparó entre dos grupos: conductores sin accidentes en un periodo de 3 años y conductores con al menos un accidente. Para el grupo con accidentes, hubo una disminución constante de sus valores de aceleración en el tiempo, pero esto no fue relacionado con sus accidentes. Una reducción similar se presentó en el grupo que no tuvo accidentes.

Los resultados parecen estar de acuerdo con la teoría de la propensión a los accidentes; donde el comportamiento del conductor a través del tiempo es estable. Sin embargo, esta estabilidad es relativa dentro de la muestra y no es absoluta. La reducción de los valores de aceleración para ambos grupos a través del tiempo que parece indicar que los conductores aprenden de sus experiencias en general, pero no específicamente de accidentes. Este estudio indica que la experiencia diaria de situaciones de conducción es el factor más importante para los cambios en el comportamiento de la conducción.

De igual manera, Iversen y Rundmo (2012), estudiaron los cambios de actitud de los conductores en Noruega hacia la seguridad del tráfico y el comportamiento de los conductores desde el año 2002 al 2008. Los resultados de este estudio se basaron en la respuesta de un cuestionario respondido por redes sociales, con dos muestras independientes y representativas de conductores noruegos. La muestra poblacional para el año 2000 fue de 2.614 conductores y para el año 2008 fue de 1.731 conductores. Los resultados mostraron que, aunque ambas actitudes y el comportamiento reportado con cambiaron de manera significativa, los cambios eran pequeños a moderados y todos, excepto uno, fueron enfocados hacia una mayor seguridad al conducir.

Similarmente, Musicant *et al.*, (2015), realizaron un estudio basado en el uso de teléfonos inteligentes para motivar a conductores novatos a monitorear su comportamiento. En este trabajo se buscaba alentar a los conductores jóvenes a utilizar los sistemas de captación de comportamiento, lo cual es un reto. Una vez se hizo la retroalimentación de esta captación, a los conductores y a sus padres, ese riesgo de comportamiento en la conducción se redujo: la forma como se obtuvo la información fue con una aplicación en los celulares, que otorgaban premios y recompensas, haciendo que el grupo de jóvenes

usaran este sistema y se rompiera la barrera de captura de información de comportamiento al conducir.

Usando una tecnología pasada en GPS, Ellison *et al.*, (2015) estudiaron los perfiles de comportamiento de conductores para el análisis de la seguridad vial. El comportamiento del conductor es un factor que contribuye en más del 90% de los accidentes de tránsito, contradiciendo lo analizado por Arias y Colucci (2006). El perfil de comportamiento de conductor (*Driver Behavior Profile DBP* por sus siglas en ingles), se introdujo como un enfoque para evaluar el comportamiento de un conductor en función del riesgo de un accidente fortuito.

Se recolectaron datos a partir de dispositivos GPS y se complementaron con información espacio-temporal. Los resultados mostraron que incluso después de hacer controles por la influencia del entorno de la carretera, estos factores de comportamiento siguen siendo los predictores más fuertes de lo que sugiere el comportamiento del conductor.

Diferentes ambientes espacio-temporales de tráfico heterogéneo, provocaron una variedad de respuestas en los conductores. Estos resultados son de gran interés para las compañías aseguradoras en la mejora de los perfiles de riesgo de los conductores y al gobierno, a través de la evaluación del impacto de cambio del comportamiento en intervenciones en las vías.

De modo similar, Román *et al.*, (2015), identificaron los cambios en el comportamiento de conducción que inciden en la disminución de riesgo de accidente en los primeros meses de conducción es clave para reducir el riesgo de accidentes y fatalidades en conductores con poca experiencia al conducir. Se analizó la información obtenida a partir de 1.148 conductores que participaron en este estudio en el Reino Unido.

La encuesta de comportamiento del conductor fue completada con conductores que obtuvieron su licencia después de 6 meses, 1, 2 y 3 años. Los modelos de crecimiento lineal indicaron un aumento significativo en el comportamiento de conducción imprudente.

Estos análisis mostraron que las heterogeneidades observadas en trayectorias individuales se explican por la presencia de múltiples grupos homogéneos de conductores, cada uno mostrando trayectorias específicas de conducción inusuales.

Los conductores hombres y más jóvenes presentan mayores niveles de comportamiento imprudente. Con estos hallazgos se plantearon los fundamentos para analizar el comportamiento y disminuir la cantidad de accidentes en los primeros meses de conducir.

Similarmente, Scialfa *et al.*, (2011), desarrollaron en varios estados de Australia una prueba de percepción de riesgo, en donde a los observadores se les presentaron videos de corta duración y se les obligó a indicar la presencia de conflictos de tránsito heterogéneo que darían lugar a una colisión. Luego de eliminar las escenas que crearon conflicto (e.g. muchos observadores no reconocieron un peligro) se determinó un grupo controlador (conductores principiantes vs. conductores expertos de la misma edad), sobre la base de la existencia de diferencias individuales en la reacción en el tiempo, tasa de fallas y tasas de falsas alarmas.

El grupo de principiantes fue significativamente más lento en responder a los peligros, aún después de hacer un control por edad. Después de seleccionar las escenas con el grupo que mostró las diferencias más altas, se seleccionó una prueba con 18 diferentes escenas, en las cuales se pueden separar los grupos que difieren en la experiencia al conducir y así, analizar cómo estas diferencias tienen implicaciones relevantes para obtener la licencia de conducir.

De igual manera, Ben-Bassat y Shinar (2011), evaluaron en un simulador, el comportamiento y la percepción de conductores en vías en las cuales se analizaron 30 diferentes escenarios de tráfico heterogéneo, con 22 participantes; en estos escenarios se simuló una vía sin barrera y luego en los mismos escenarios se instaló una barrera semirrígida

Los resultados mostraron un efecto significativo de la geometría de la carretera tanto en medidas objetivas como subjetivas. Cuando la barrera está ausente, el ancho de la berma pierde muchos de sus beneficios y efectos sobre el comportamiento del conductor al volante. Los resultados también demuestran que la geometría de la calzada puede ser usada para reducir la velocidad de conducción, pero al mismo tiempo puede tener un efecto negativo en el mantenimiento de una posición en el carril estable en curvas cerradas. Por lo tanto, el control del ancho de las bermas y la instalación de una barrera parece ser un enfoque más seguro para el control de la velocidad y la posición en el carril.

Hassan y Abdel-Aty (2013) desarrollaron en la Universidad Central de la Florida su investigación acerca de las implicaciones en el comportamiento, las actitudes y las percepciones de conductores jóvenes. Este estudio identificó y cuantificó los factores significativos (e.g. comportamiento inusual al conducir, población) asociados con la participación de conductores novatos entre 16 y 17 años, con licencia restringida y con otro grupo de jóvenes entre los 18 y los 24 años, con licencia sin restricciones.

Los resultados revelaron que las violaciones agresivas, las distracciones dentro del vehículo y las características demográficas fueron factores significativos que afectan a conductores en el rango de 16 a 17 años. Para el grupo de 18 a 24 años, estos factores fueron las actitudes frente a las características demográficas y el exceso de velocidad. Los participantes reconocieron que el evitar llegar tarde es la razón principal para tomar el riesgo de conducir a mayor velocidad, acortando brechas entre vehículos, seguido de competir con otros vehículos.

Por otro lado, Hamdar y Schorr (2013) publicaron un documento acerca del desarrollo de un índice cuantitativo de propensión de seguridad, el cual captura la tendencia general de un entorno que ocasiona un ambiente inseguro para conducir. Este estudio se hizo en dos condiciones de flujo heterogéneo a saber: interrumpido y sin interrupciones. Se usaron técnicas de modelado para determinar el índice a partir del clima, el tipo de vehículos, el comportamiento de los conductores y el tráfico de la carretera. Para llegar a esta meta, se obtuvieron datos del Departamento de Transporte de Virginia y de las librerías de accidentes de FARS/GES (*Fatality Analysis Reporting System*).

Los modelos de ecuaciones estructurales encontraron diferentes percepciones que permiten evaluar el impacto de la seguridad en los diferentes entornos. Este índice proporcionó una base para la cuantificación de los efectos de las características mencionadas en materia de seguridad; una base para comparar las diferencias entre los factores que afectan a la seguridad en los diferentes escenarios de flujo y la una clasificación de carreteras para mejorar la eficiencia de la seguridad.

De modo similar, Norza *et al.*, (2014), analizaron la incidencia del factor humano en la accidentalidad vial en el territorio colombiano, y se identificó evidencia empírica para la formulación de política pública del tránsito. Como resultados concluyeron que conductores con nivel educativo superior inciden en menor número de accidentes; peatones con menor nivel educativo inciden en mayores conductas riesgosas; c) las mujeres tienen actitud

positiva y perciben la eficacia de campañas en prevención; d) conductores con estilos de conducción iracundo, ansioso, riesgoso y de alta velocidad cometen más infracciones y accidentes; e) desobedecer las señales de tránsito, es la principal causa de accidentalidad; f) la agresividad, la hostilidad y el estrés en el tránsito son factores que aumentan la probabilidad de accidentes y, finalmente, las campañas de prevención no están siendo captadas por la población más afectada.

En este orden de ideas, Warner y Aberg (2014), estudiaron la tendencia de los conductores a cometer comportamientos inusuales al conducir en comparación con su percepción frente a otros conductores que tienen la misma conducta al conducir. Este estudio se realizó en Suecia y Turquía. Con una muestra poblacional de 228 conductores en Suecia y 302 conductores en Turquía, se completaron unos cuestionarios acerca del comportamiento del conductor.

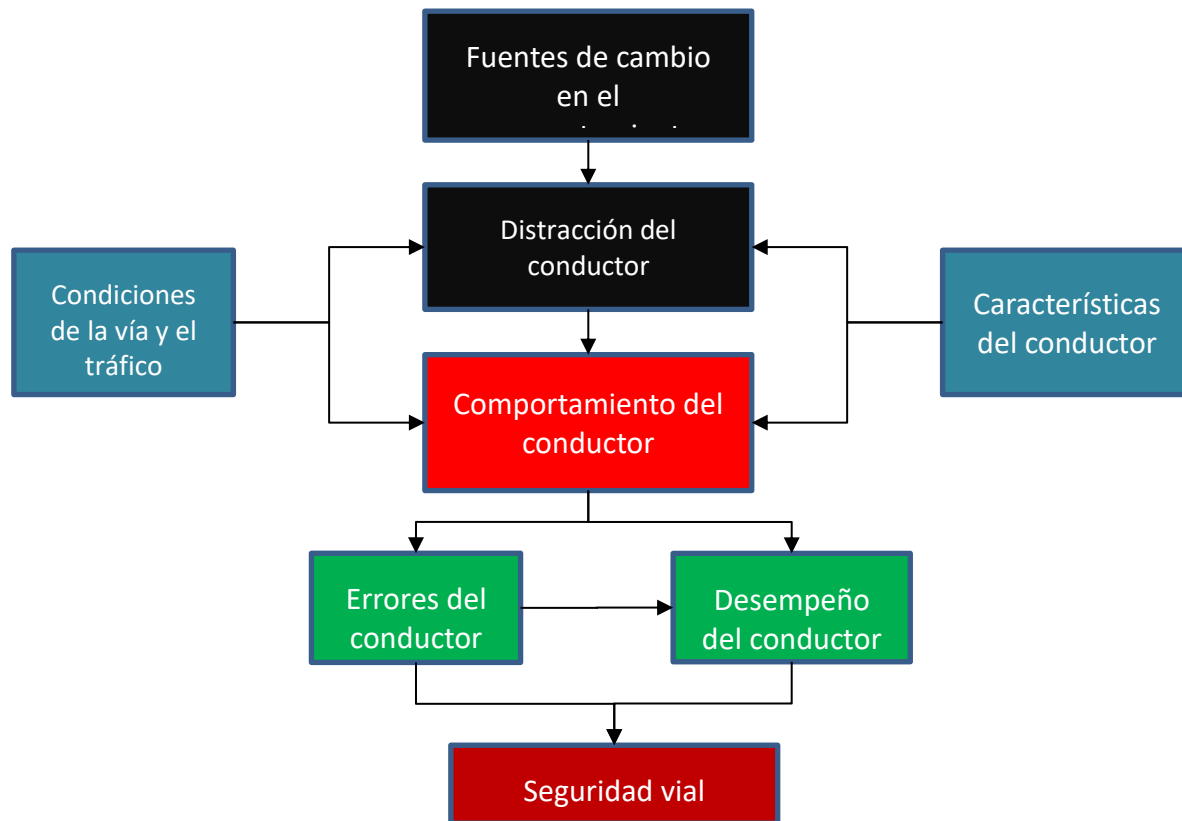
Los resultados mostraron que, tanto en Suecia como en Turquía, los conductores informaron haber cometido comportamientos inusuales al conducir. Sin embargo, varían dependiendo del elemento de la encuesta y sugieren que esta variación puede ser utilizada como un factor para comprender la aceptabilidad social

Bella (2014), planteó una hipótesis de la percepción del conductor, con un estudio de simulación de conducción. De acuerdo con su hipótesis, las curvas horizontales aparecen más planas o nítidas cuando se superponen sobre curvas verticales cóncavas o convexas. Estas pruebas se hicieron en un simulador de conducción interactivo llamado CRISS. Los resultados obtenidos de los análisis estadísticos mostraron que no se apoya la hipótesis de la percepción de pandeo en las diferentes combinaciones de curvas, ya que las velocidades de los conductores no cambiaron.

Finalmente, Alonso (2016), determinó cómo se percibe el problema del accidente de tráfico entre los principales profesionales técnicos y administraciones responsables involucrados principalmente en el campo de la infraestructura, centrándose en la consideración del criterio del factor humano en el diseño y gestión de carreteras. También describió las Auditorías de Seguridad Vial y otros tipos de métodos proactivos de Gestión Integral de la Seguridad de la Red Vial en las diferentes fases de vida de la infraestructura.

La Figura 4 expone de manera clara cuál es el marco conceptual planteado para el análisis del comportamiento de un conductor, ya sea en una carretera rural o urbana, en un ambiente natural y un ambiente controlado como lo es en un simulador de conducción.

Figura 4. Marco conceptual para el análisis del comportamiento de un conductor



Fuente: el autor

Se han podido identificar algunos valores que afectan la probabilidad que ocurra un accidente de tráfico y las lesiones ocasionadas en el mismo; por ejemplo, existe un área de investigación que demuestra cómo ha sido el incremento de accidentes de tránsito y muertes que son consecuencia de factores humanos, como son el exceso de velocidad, conducir bajo la influencia de alcohol y/o sustancias alucinógenas, el poco uso de cinturones de seguridad, sillas para bebés, cascos en usuarios de motocicletas y la distracción de los conductores. (Elvik, 2004; Pedden *et al.*, 2004).

Más específicamente, **la distracción del conductor** es estimada a ser la causa más crítica de generación de accidentes de tránsito en el mundo y con un incremento importante (Yannis, 2013). Aunque la distracción del conductor puede considerarse como algo que

hace parte del día a día al momento de estar conduciendo, la incorporación de nuevas tecnologías dentro de los vehículos y el aumento esperado de dichos dispositivos y teléfonos celulares en los próximos años, hacen que la investigación en las áreas de comportamiento de conductores y seguridad vial sean muy esenciales. (Olsen 2005).

La distracción del conductor ocurre cuando la atención del conductor es, de manera voluntaria o involuntaria, desviado en su tarea de conducir, por un evento en la medida que el conductor ya o puede continuar con la tarea de conducir de una manera segura y correcta (Regan et al., 2008). Existen 4 tipos de distracciones del conductor: la distracción física, la distracción visual, la distracción auditiva y la distracción cognitiva. Una actividad distractora puede involucrar a una o más de uno de estos tipos de distracción. Adicionalmente, estos factores distractores se pueden dividir como los que ocurren dentro del vehículo y los que ocurren fuera del vehículo.

En este contexto, existen varios tipos de experimentos para evaluar el comportamiento humano y de manera detallada, la distracción del conductor. Como son experimentos de conducción natural, en un simulador de conducción, en carretera, investigación de accidentes de tránsito y encuestas sobre comportamiento y opinión.

Concentrándose en los simuladores de conducción, estos permiten evaluar variables como lo son la eficiencia en la conducción en un escenario controlado, que es muy aproximado a la realidad y en un entorno seguro de conducción. Sin embargo, como varían de manera sustancial sus características, esto puede afectar el realismo y la validez de resultados obtenidos. Sin embargo, los simuladores de conducción son cada vez más utilizados para analizar y tomar medidas de la distracción del conductor y se han realizado numerosos experimentos en la última década. (Regal et al., 2008)

Para el desarrollo de esta investigación doctoral se partió de una base de datos de fatalidades ocurridas por accidentes de tránsito en las carreteras de Colombia, suministrada por la Dirección de Tránsito de la Policía Nacional de Colombia y a partir de esta información, se depuró, organizó y se elaboró una estadística descriptiva, observando las tendencias de fatalidades por año, mes, día, hora, tipo de carretera, rango de edad, posible causa del accidente y tipo de vehículo en el cual ocurrió la fatalidad, teniendo en cuenta los géneros de los fallecidos en los accidentes.

A partir de la información anterior, se procedió a determinar el tamaño de la muestra poblacional para la ejecución del experimento, siendo esta muestra validada estadísticamente y conservando el mismo comportamiento del universo analizado y explicado en el párrafo anterior.

Para la ejecución del experimento, se precedió a construir un simulador de conducción, el cual cuenta con las características físicas de una cabina de conducción de un vehículo se utilizó el programa de simulador de conducción desarrollado por la firma Foerst Simulation, con el cual, en tiempo real, se midió el grado de concentración de cada uno de los participantes del experimento mientras conducían en un escenario con las mismas características para todos los participantes y con el uso de la diadema Neurosky, se capturaron las ondas cerebrales de los participantes del experimento, mientras se enviaban mensajes al celular usando la aplicación de mensajería instantánea *Whatsapp*.

La información obtenida fue procesada y analizada utilizando inteligencia artificial, con la técnica de redes neuronales y Machine Learning. Esta información depurada, permitió observar el grado de concentración y los errores más comunes cometidos por los participantes del experimento y con este análisis de la información obtenida, plantear un modelo de comportamiento de conductores, que pueden ser los principales causantes de la generación de accidentes de tránsito.

Se logró comprobar que las personas jóvenes entre los 18 a los 45 años son más propensos a distraerse por estar pendientes de su celular y de los mensajes enviados a partir de la aplicación de mensajería instantánea *Whatsapp*, que el grado de concentración en personas mayores a 50 años decae por factores del escenario de conducción, pero no así por los mensajes recibidos a través del celular.

Los modelos matemáticos obtenidos como aporte a la generación de nuevo conocimiento dependen del grado de concentración de los conductores y la edad y varía, dependiendo del escenario, de las condiciones climáticas, el tipo de carretera, la hora en la que se conduce, el tipo de vehículo y el tipo de transmisión en la cual se conduce. También incide el género, el estrato socioeconómico y el nivel educativo de los participantes del experimento.

El resultado innovador de esta tesis doctoral consiste en cuatro contribuciones científicas. La primera se refiere a la contribución metodológica de la investigación, las demás son las contribuciones de investigación de esta tesis doctoral como lo son:

- El desarrollo de un modelo de comportamiento de conductores que puede replicarse en cualquier escenario que ofrece el simulador.
- Un experimento con rigurosidad en un simulador de conducción
- Un innovador análisis a partir del uso de inteligencia artificial y Machine Learning atadas a medición de ondas cerebrales para analizar el comportamiento de conductores ante un efecto distractor.
- La medición del efecto distractor por el uso de mensajería de texto instantánea *Whatsapp* de teléfonos inteligentes en conductores de diferentes edades y género.

La primera contribución científica consiste en el desarrollo de un modelo de comportamiento por medio del uso de inteligencia artificial, en el cual se evaluaron las conductas riesgosas mientras los sujetos de la prueba conducían en el simulador de conducción, construido especialmente para la ejecución de esta investigación, evaluando los errores y creando un modelo que determina a partir de un umbral, si el conductor en la prueba se encuentra concentrado o desconcentrado al momento de conducir en el simulador. Adicionalmente, se evaluó si el incremento del riesgo accidentes incide por la distracción del conductor por estar observando los mensajes recibidos por *Whatsapp* como el factor principal o influyen otros errores al conducir.

La segunda contribución científica doctoral de esta tesis consiste en el diseño y la implementación de un experimento en un simulador de conducción y cuenta con un riguroso estado del conocimiento, donde se explican las fortalezas y debilidades del uso de simuladores de conducción y los estudios previos sobre los temas de distracción de conductores.

La tercera contribución científica doctoral es el análisis del comportamiento de conductores por medio de la medición de ondas cerebrales y el análisis de estas por medio del uso de inteligencia artificial, donde se analiza el comportamiento de conductores ante un efecto distractor mientras conduce en el simulador de conducción, evaluando adicionalmente los errores cometidos en el desempeño al conducir durante la prueba.

Finalmente, La cuarta contribución científica doctoral consiste en la medición del efecto distractor por el uso del servicio de mensajería instantánea *Whatsapp*, mientras se conduce en el simulador de conducción, evaluando el comportamiento y las conductas riesgosas que pueden cometerse por observar mensajes mientras se conduce.

El enfoque adoptado en esta investigación doctoral es presentado en 6 capítulos distribuidos de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se hace una introducción a los modelos de comportamiento según su aplicación, como el proceso de conducción humana, modelos actuariales, la seguridad vial, ingeniería forense, de conductores, los estudios que se han desarrollado sobre el tema, y factores distractores. Se plantea la pregunta de investigación, los objetivos generales y específicos, los limitantes de esta investigación, los tipos de distracción y las fuentes distractoras que afectan a los conductores.

En el capítulo 2 se introduce al lector al desarrollo metodológico de esta investigación doctoral, explicando el diseño del experimento, la selección de la conducta a estudiar, la selección y construcción del simulador de conducción, el diseño del escenario de simulación, la selección del sensor de actividad cerebral para medir la concentración, la obtención del grupo de participantes y las especificaciones de entradas y salidas del modelo a construir,

En el capítulo 3, se presenta al lector los resultados y la construcción del modelo, donde se hace un análisis exploratorio de los resultados experimentales, las alternativas exploradas para construir los modelos, los modelos construidos con regresión logística, con árboles de decisión y con el uso de una red neuronal. la metodología utilizada para el análisis de datos, para, finalmente, presentar el modelo de comportamiento de conductores a partir de los modelos desarrollados en este capítulo como aporte a la generación de nuevo conocimiento.

Finalmente, en el capítulo 4, las conclusiones, las recomendaciones y los resultados de generación de nuevo conocimiento

Capítulo 1. Modelos de Comportamiento de un conductor.

El capítulo 1 introduce al lector en el tema de los modelos de comportamiento y los factores que influyen en el comportamiento de conductores, las funciones cognitivas, la distracción del conductor y el efecto del uso de teléfonos inteligentes. Adicionalmente, se plantea la pregunta de investigación, el objetivo general y los objetivos específicos de esta disertación doctoral.

Desde la perspectiva de una persona común y corriente, la atención puede significar para esta persona, la concentración en la ejecución de una tarea o labor, orientarse espacialmente para ir a algún lugar y las actividades asociadas a la atención son la distracción, la concentración y la meditación (Gómez, 2017).

Gallegos y Gorostegui (1990) definen la atención como “la capacidad de seleccionar la información sensorial y dirigir los procesos mentales”. Explicado de una manera más clara, para poder activar el proceso de atención y concentración es necesario seleccionar un estímulo, dando inicio a la percepción, seguido de la selección de la atención; una vez ha ocurrido esta selección es necesario que se mantenga la atención para luego, dar paso a otra actividad y finalmente se reciba un nuevo estímulo.

AL seleccionar un estímulo, se focaliza la atención en un tema específico lo cual permite que el cerebro se concentre y activando los procesos que son necesarios para el aprendizaje como el analizar, el comparar y el relacionar.

Hay varios tipos de atención, que incluyen los procesos internos del cerebro hasta los procesos externos que se desarrollan en el entorno; existen algunos que se ejecutan de manera involuntaria y otros de manera voluntaria. En el proceso del aprendizaje, la atención se clasifica en atención sostenida, atención selectiva y la atención dividida.

La atención sostenida es aquella en la cual se basan los procesos psicológicos e implican los estados de alerta y vigilancia. La atención selectiva es la encargada de inhibir todos los estímulos sensoriales y selecciona aquellos estímulos que interesan. Finalmente, la atención dividida permite ejecutar de forma eficiente, más de una tarea simultáneamente.

Por otro lado, la concentración se define como “el aumento de la atención sobre el estímulo en un espacio de tiempo determinado” (Gallegos y Gorostegui,1990). Durante la concentración, se debe mantener el proceso del mantenimiento de la atención, luego, se desarrolla el procesamiento de la información en el cerebro y finalmente se desarrolla el proceso del análisis, clasificación, comparación y asociación.

En el proceso de aprendizaje, se hace necesario que la persona esté atenta a su entorno y de los elementos que se encuentran asociados a este proceso, para lo cual, es primordial la concentración. Este proceso es importante para los conductores, ya que es explicado por la psicología del transporte.

La psicología del tránsito y transporte es definida como el estudio de todos los procesos psicológicos relacionados al comportamiento humano y más específicamente en el área del transporte, del tránsito y de la movilidad de los seres humanos. Como tal, esto conlleva a una gama variada y muy amplia de problemas en torno a este tema, incluyendo entre los más importantes, las teorías cognitivas de la conducción. De acuerdo con Ledesma *et. al.*, (2011), “La psicología del tránsito es una disciplina aplicada con un objetivo práctico bien definido: mejorar las condiciones del tránsito y la calidad de la movilidad humana a partir del conocimiento de sus aspectos psicológicos. Si bien esto incluye múltiples dimensiones del tránsito y el transporte, los psicólogos nos hemos centrado principalmente en la seguridad vial. En este sentido, el campo de acción ha sido básicamente el estudio del factor humano como fuente potencial de riesgos”.

El hombre siempre ha intentado realizar modelamiento de los procesos que observa en la naturaleza, queriendo modelar incluso, el comportamiento humano a través de simulaciones. De acuerdo con Train (2009), la simulación permite que se hagan estimaciones de modelos que no se pueden procesar, por diferentes métodos. En otras palabras, cualquier situación de la naturaleza puede ser modelada y se pueden hacer las estimaciones necesarias mediante alguna metodología de simulación. Lo importante es

poder escoger el método que se ajuste más para los casos prácticos que se desean analizar y a partir de estos, poder generar nuevos métodos para proponer soluciones que no son posibles con los modelos y metodologías existentes. La simulación permite, en otras palabras, obtener una aproximación a las probabilidades de elección de los modelos de comportamiento.

James Heckman y Daniel McFadden, investigaron sobre los modelos de elección, y diseñaron los métodos para comprender el comportamiento económico de las economías familiares y los individuos, por el desarrollo de la teoría y métodos para analizar muestras selectivas y por el desarrollo de la teoría y métodos para analizar modelos de elección discreta aplicando su modelo en el desarrollo del transporte público de San Francisco y más exactamente en el sistema del metro, obteniendo el premio Nobel de economía en el año 2000.

Es por esto que, enfocándose en el área de la seguridad vial y el comportamiento humano, investigadores de diferentes universidades han combinado las áreas de la psicología, del transporte, la seguridad vial y los sistemas computarizados para modelar el comportamiento humano y de esta manera entender las causas que son generadoras de accidentes de tránsito. El referente internacional de estas investigaciones es el Dr. Alex Pentland del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), quien en su publicación titulada *Modeling and Prediction of Human Behavior* (Pental and Liu, 1999), abre el camino de la modelación asistida con herramientas computacionales a través de cadenas de Markov, para predecir el comportamiento mientras se conduce y las reacciones cuando tiene que frenar el vehículo. Los autores, a través de cadenas dinámicas de Markov, realizando ajustes de tiempo. Mientras un conductor conduce en una curva, este puede ser modelado teniendo una serie de estados λ , para cada instante, cuando entra en la curva, en la curva y cuando sale de la curva. Dichas transiciones entre estos estados deben ocurrir en el orden indicado. Para simular esta situación, se elaboró un simulador con la cabina de un vehículo para Nissan, modelo 240 SX, el cual fue instrumentado para grabar los ángulos de giro, posición de los frenos y acelerador, ángulo del timón, entre otros.

En el experimento, los conductores iban en un escenario simulado a una velocidad de 30 a 35 mph, y se grabó la información del vehículo en intervalos de 1/10 de segundo. Con la información obtenida, se hizo una clasificación bayesiana y se hizo un modelamiento multigaussiano y se compararon los resultados con los modelos elaborados en

computador, demostrando que se puede categorizar con precisión las acciones de la conducta humana usando modelamiento pudiendo generalizar este comportamiento a otros sistemas dinámicos hombre-máquina., para reconocer automáticamente la acción prevista por las personas y así, generar sistemas de control que se adaptan dinámicamente mejor al propósito del ser humano.

Murillo (2003) realizó una investigación en la cual utilizando un modelo conceptual del comportamiento de conductores de automóviles, representado en el Razonamiento Basado en Contextos (CxBR – Contextbased Reasoning), evaluando conductores en Costa Rica. Este paradigma busca simular el comportamiento de una manera simple, donde se usan identificadores intuitivos, en este caso, el contexto. Este contexto representa todas aquellas condiciones en un momento específico, controlando el comportamiento en una simulación. Cuando el escenario cambia, el contexto actual que ese encuentra activo busca otro contexto que pueda controlar las condiciones de este nuevo escenario. El comportamiento de los contextos es similar al de un árbol de decisión.

La autora encontró un modelo teórico de comportamiento de conductores, que al ser comparado con las especificaciones de estados Unidos, resultó similar. La principal diferencia fueron los valores que se asumieron como fueron la velocidad y la distancia desplazada. La frontera del comportamiento entre cada uno de los contextos evaluados no se encuentra muy bien definida, como si se observó en el modelo elaborado en Estados Unidos. Concluyendo que cada contexto debe abarcar muchas mas escenarios y situaciones.

Okamoto y Tsiotras (2019), analizaron los sistemas de asistencia al conductor (ADAS por sus siglas en inglés), las cuales emplean un modelo de conducción único, para predecir la interacción hombre-máquina, en un futuro inmediato (por ejemplo, en los próximos segundos), pero encontraron una enorme variabilidad en la forma de conducir de cada persona, lo cual conlleva a a elaborar modelos de conducción personalizado, basados en datos recopilados de las acciones reales observadas de los conductores- Los autores carecen del conocimiento suficiente de las funciones cognitivas de alto nivel y los modelos tradicionales de la teoría del control presentan dificultades para predecir con precisión las acciones del conductor, Los autores compararon algoritmos utilizados para predecir las acciones de control lateral en conductores, para saber como el conductor es controla el

vehículo. Los autores propusieron una metodología para estimar el control en el timón del vehículo y los compararon con los datos obtenidos en simuladores para evaluar rendimientos y eficiencias en situaciones reales y simuladas.

Kummetha *et. al.*, (2020), analizaron los procesos fisiológicos (cambios biológicos dentro del cuerpo) , y físicos (relacionados con el motor) al momento de conducir, y que ocurren simultáneamente. La complejidad de esta tarea depende de varios factores, y esta investigación se concentró en las configuraciones de las zonas de trabajo y su efecto sobre el rendimiento del conductor. Debido al aumento de fatalidades en zonas de trabajo en Estados Unidos entre 2015 y 2018, junto con la muy limitada literatura sobre el comportamiento de los conductores en diferentes entornos de conducción, se requieren estudios más completos. Debido a los accidentes de tránsito, específicamente cuando se salen del carril los conductores, el comportamiento de la mirada proporcionó una dimensión fisiológica adicional a la investigación desarrollada.

Los autores propusieron un modelo que comprende las interacciones entre las características del conductor, la carga de trabajo mental y la conciencia de la situación, con control longitudinal, lateral y comportamiento de la mirada. El experimento consistió en hacer un análisis de accidentes en un simulador de conducción con 90 participantes para investigar el rendimiento y los cambios basados en la mirada con relación a varias configuraciones del entorno a conducir. Los resultados mostraron una interacción significativa entre el control longitudinal y la desviación estándar de la posición horizontal de la mirada en la predicción del control lateral. Además, se observaron diferencias significativas en el control lateral y las variaciones de la mirada horizontal entre ambos géneros. Las mujeres conductoras mostraron menores desviaciones de la posición lateral y menor variabilidad de la mirada horizontal. Instalar las barreras de seguridad de la zona de trabajo más lejana, hasta un metro de los bordes del pavimento, podría disminuir significativamente la carga de trabajo mental y mejorar la seguridad en las zonas de trabajo.

Markula *et. al.*, (2019), propusieron un modelo de comportamiento computacional basado en mecanismos neurobiológicamente plausibles para explicar de manera empírica, los efectos observados como son la disminución del rendimiento de la tarea y aumento del esfuerzo de la dirección durante la exposición inicial, seguida de una reversión parcial de estos efectos a medida que se prolonga la exposición de la tarea. Los investigadores

encontraron que el modelo también reprodujo otro hallazgo empírico inexplicado: un óptimo local para la para la reducción de la escala de movimiento, donde el seguimiento de la trayectoria es mejor que cuando están disponibles las señales de movimiento uno a uno.

En general, los hallazgos sugieren que los conductores hacen uso directo de la información vestibular como parte de la determinación de las acciones de dirección apropiadas, y la reducción del movimiento provoca un fenómeno de subestimación de la velocidad de guiñada, donde los conductores se comportan como si el vehículo simulado estuviera girando más lentamente de lo que es. Sin embargo, en la tarea de conducir y esquivar vehículos, un cierto grado de subestimación trae un beneficio de rendimiento de seguimiento de ruta. Además, la adaptación del comportamiento en las tareas de conducción de esquivar vehículos simuladas puede ocurrir debido a la reducción de peso de las señales vestibulares y / o una mayor sensibilidad en el tiempo y la magnitud de las correcciones de dirección, pero aparentemente no en el forma de un cambio de escala compensatorio completo de la entrada vestibular recibida. Los análisis presentados aquí proporcionan nuevos conocimientos e hipótesis sobre la conducción simulada y el diseño de simuladores, y los modelos desarrollados se pueden utilizar para respaldar la investigación sobre la integración multisensorial y la adaptación del comportamiento tanto en la conducción como en otros dominios de tareas.

Basándose en estudios anteriores y de acuerdo con lo estudiado por Petridou y Muostaki (2000), hay factores humanos que inciden en la capacidad del conductor para enfrentar contingencias de tráfico en el corto y largo plazo, lo cual afecta los riesgos que debe tomar mientras conduce. Estos factores también pueden ser modelados para evaluar su incidencia en el comportamiento humano al conducir. En la tabla 1 se pueden ver cuáles son estos factores

Tabla 1 Factores humanos que afectan el comportamiento del conductor y la seguridad

Reduce la capacidad ante contingencias de tráfico

Corto plazo	Distracción temporal Efecto de alcohol Efecto de las Drogas Somnolencia y fatiga Ahogamiento por comida Stress
Largo plazo	Vejez Inexperiencia Enfermedad y discapacidad Alcoholismo y abuso de drogas Propensión a accidentes

Modula la toma de riesgos mientras conduce

Corto Plazo	Actos compulsivos Comportamiento suicida Consumo moderado de etanol Drogas psicotrópicas Vehículo involucrado en crímenes
Largo plazo	Sobreestimación de capacidades, actitud de “macho” Incidentes en el comportamiento del conductor Alcoholismo No usar cinturón de seguridad o casco Velocidad habitual Irrespeto habitual a las normas de tránsito Propensión a accidentes Sentado inapropiadamente mientras conduce

Adaptado de Petridou y Moustaki (2000)

La vejez, enfermedades y discapacidades se encuentran entre los factores claves que pueden incidir en la capacidad de conducir con seguridad, ya que los conductores de edades más avanzadas tienen mayor probabilidad de sufrir de déficits cognitivos, motrices y de percepción que pueden afectar la conducción. Sin embargo, este tipo de conductor puede compensar sus deficiencias funcionales, ajustándose a su manera de conducir, pero muchas enfermedades y discapacidades pueden reducir su capacidad de conducir.

1.1 Funciones cognitivas críticas para una conducción segura

Conducir es una tarea compleja que requiere poseer suficiente conocimiento cognitivo, visual y habilidades motoras. El conductor debe tener la fuerza motriz, velocidad y coordinación. Quizás lo más importante es que las habilidades cognitivas incluyen concentración, atención, habilidades visuales de percepción adecuadas, visión, pericia y memoria, deben estar presentes. Las funciones corticales superiores requeridas para conducir incluyen habilidades de comportamiento estratégicas y de toma de riesgos, que implican la capacidad de procesar múltiples señales ambientales simultáneas con el fin de tomar decisiones, precisas y seguras. La tarea de conducir requiere la capacidad de recibir información sensorial, procesar esta información y tomar adecuadas y oportunas (Waller, 1980; Freund *et al.*, 2005).

Las funciones cognitivas relacionadas con la conducción se pueden clasificar en los siguientes seis dominios neuropsicológicos (Reger *et al.*, 2004):

- estado mental: cognición general
- atención – concentración
- funciones ejecutivas
- lenguaje – funcionamiento verbal
- habilidades visuoespaciales
- memoria

LaBerge (1997) hizo una distinción entre tres aspectos de atención:

Selección, preparación y mantenimiento. La selección es un proceso rápido, que normalmente se usa en tareas de búsqueda para separar un objetivo de los distractores. La preparación es un proceso más lento, que ocurre cuando un individuo presta mayor atención para concentrarse en un próximo estímulo sin ser distraído por eventos irrelevantes. El mantenimiento de la atención es la capacidad de asignar atención hacia una fuente de estímulo durante un período de tiempo relativamente largo.

Algunos investigadores como Parasuraman y Nestor (1991) y Duchek *et al.*, (1998), han argumentado que la atención selectiva es más específica en déficits de conducción en

adultos mayores, o en conductores con alguna condición patológica (por ejemplo, demencia).

1.1.1 Distracción del conductor

La distracción del conductor constituye un factor humano particular como causal de generación de accidentes de tránsito. La distracción del conductor se define generalmente como "un desvío de atención al conducir, porque el conductor se está enfocando temporalmente en un objeto, persona, tarea o evento no relacionado con la conducción, lo que reduce la conciencia del conductor, para tener la capacidad de toma de decisiones y / o rendimiento, lo que conlleva a un mayor riesgo de acciones correctivas, cuasichoques o choques" (Regan *et al.*, 2008).

1.1.2 Tipos de distracción del conductor.

Existen cuatro tipos de distracción del conductor: distracción física, distracción visual, distracción auditiva y distracción cognitiva. Una actividad que distrae implica uno, o más de estos tipos de distracción. El acto de operar un teléfono celular de mano, por ejemplo, puede implicar los cuatro tipos de distracción (Breen, 2009).

- **Distracción física:** Ocurre cuando el conductor usa una o las dos manos para manipular el teléfono para marcar un número telefónico, contestar o terminar una llamada en lugar de concentrarse en las tareas físicas requeridas para conducir (Young *et al.*, 2003).
- **Distracción visual:** es causada por la cantidad de tiempo que los ojos del conductor están en el teléfono celular y fuera de la carretera o, mientras habla por teléfono, observa la carretera, pero sin ver. El uso de teléfonos celulares que muestran información de manera visual (por ejemplo, leer mensajes de texto) mientras conduce, distraerá aún más la atención visual del conductor por fuera de la carretera (Dragutinovits and Twisk, 2005).
- **Distracción auditiva:** puede ocurrir cuando el conductor reacciona por el timbre inicial del teléfono, por los sonidos de mensajes de texto recibidos o por la llamada que se esté desarrollando en ese momento.
- **Distracción cognitiva:** implica fallas en la atención y el juicio. Ocurre cuando se realizan dos tareas mentales al mismo tiempo. La conversación telefónica compite

con las exigencias al conducir. Escuchar solo puede reducir la actividad en la parte del cerebro asociada con la conducción en más de un tercio (Ma et al., 2008). El alcance de los efectos negativos del uso del teléfono celular mientras se conduce dependen de la complejidad de las conversaciones telefónicas y del escenario de conducción. Cuanto más difícil y compleja es la conversación, más fuertes son efectos en el desempeño al conducir. Cuanto más difícil es el escenario donde se conduce, se espera que la conversación telefónica tenga más impacto (SWOW, 2008).

Es importante caracterizar las conductas riesgosas de los conductores y las posibles causas que pueden ocasionar los accidentes. Entre ellas se tiene:

- Desconocimiento de las leyes de tránsito
- Fallas mecánicas y/o eléctricas
- Imprudencia al conducir
- Desperfectos mecánicos
- Ausencia de dispositivos en los vehículos
- Impericia a la hora de conducir
- No cumplir normas elementales de seguridad
- Invasión de la vía por peatones
- Conducir en estado de embriaguez y/o sustancias alucinógenas
- Conducir en condiciones climáticas adversas
- Uso del celular mientras se conduce

Adicionalmente, se deben tener en cuenta las fuentes distractoras de afectan la correcta operación de un vehículo al momento de conducir. En la Tabla 2 se enumeran las diferentes fuentes distractoras tanto internas como externas que afectan la operación al conducir.

Tabla 2 Fuentes de distracción al conductor por categoría.

FUENTES DE DISTRACCIÓN AL CONDUCTOR	
EN EL VEHICULO	EXTERNAS
Pasajeros	Control de tráfico
Comunicaciones	Otros vehículos
Sistemas de entretenimiento	Buscando localización y destino
Sistemas de vehículos	Peatones/ciclistas
Comer/beber	Incidentes/accidentes
Fumar	Policía/ambulancias/Bomberos
Animales/insectos en el vehículo	Arquitectura/paisaje
Estornudando/tosiendo	Animales
Stress	Letreros de publicidad
Somnolencia	Señalización horizontal y vertical de la vía
	Sol/otros vehículos iluminados

Los factores distractores del conductor que ocurren dentro del vehículo parecen tener mayor efecto sobre el comportamiento y la seguridad del conductor. Horberry *et al.*, (2006) confirman que las fuentes de distracción dentro del vehículo tienen un efecto más importante en el desempeño del conductor, en comparación con la mayor complejidad de los estímulos recibidos de la carretera y entorno de tráfico. Adicionalmente, algunos estudios encontraron que los factores de distracción son menos del 30% de los factores de distracción totales (Stutts *et al.*, 2001; Kircher, 2007). Otros estudios especifican que los factores de distracción externos representan menos del 10% de todos los factores de distracción (Sagberg, 2001; MacEvoy *et al.*, 2007).

Un estudio realizado por Patel *et al.*, (2008) analizó las características cualitativas percibidas de 14 distracciones del conductor. Los participantes del estudio completaron un cuestionario en el que clasificó una lista de distracciones de acuerdo con ciertos criterios. La Tabla 3 muestra las clasificaciones de riesgo percibidas en promedio de cada una de las 14 distracciones del conductor. Las clasificaciones de riesgo más altas percibidas fueron asociadas con el uso de teléfonos celulares, seguidas de 'mirar un mapa o libro' y

'aseo o limpieza'. Las calificaciones de riesgo percibidas más bajas se asociaron con 'escuchar música', 'hablar con los pasajeros' y 'mirar las señales de tráfico'. Se observa que los carteles publicitarios y el paisaje tienen un nivel de riesgo percibido no despreciable como fuentes externas de distracción.

Tabla 3. Riesgos percibidos asociados con la distracción del conductor

Peligros en la distracción del conductor	Límite bajo	Límite alto	Promedio de riesgo
Escuchar música	1.2	4.8	3.3
Hablar con pasajero	2.0	5.0	3.8
Observar señales de tránsito	3.0	6.0	4.2
Uso de GPS	3.0	6.0	4.6
Uso de manos libres	3.0	6.0	4.7
Observado el paisaje	3.0	7.0	5.2
Ajustando dispositivos	4.0	7.0	5.3
Fumando	3.0	7.0	5.3
Observando avisos de publicidad	4.0	8.0	5.7
Comiendo o bebiendo	5.3	8.0	6.3
Observando un objeto	6.0	9.0	7.4
Aseándose/maquillándose	8.0	10.0	8.5
Mirando un mapa o libro	8.0	10.0	8.5
Uso del teléfono celular	8.0	10.0	8.6

Adaptado de (Patel *et al.*, 2008)

Por consiguiente, de acuerdo al estado del conocimiento presentado, la pregunta de investigación planteada fue: ¿Cómo analizar el comportamiento de conductores y poder determinar modelos de conductas riesgosas que conllevan a la generación de accidentes de tránsito utilizando datos obtenidos de un simulador de conducción?

El objetivo general de esta investigación doctoral es desarrollar un modelo del comportamiento de conductores que presentan conductas riesgosas que conllevan a la generación de accidentes de tránsito.

Los objetivos específicos que se plantearon para esta investigación doctoral se presentan a continuación:

- Caracterizar y clasificar las conductas riesgosas de los conductores para identificar tendencias de comportamiento ante situaciones que puedan generar un accidente de tránsito.
- Realizar mediciones en situaciones simuladas, de manera que se pueda analizar el comportamiento de los conductores ante la percepción del riesgo de un accidente de tránsito.
- Analizar y evaluar la conducta riesgosa de conductores a partir de información obtenida en situaciones simuladas, para la generación de un modelo de comportamiento que permita prevenir accidentes de tránsito.
- Evaluar la conducta riesgosa de conductores a partir de información obtenida en situaciones simuladas, para la generación de un modelo de comportamiento que permita prevenir accidentes de tránsito.
- Proponer un modelo que se ajuste a las condiciones y comportamiento de conductores.

En otras palabras, a partir de la información obtenida en un simulador de conducción, fue posible desarrollar un modelo a partir del uso de inteligencia artificial que permite evaluar el comportamiento de conductores que presentan conductas riesgosas las cuales conllevan a la generación de accidentes de tránsito a partir de información obtenida con datos simulados.

Las limitaciones de esta investigación se ven reflejadas en el uso del simulador de conducción, ya que, al ser condiciones controladas, hay factores que no se pueden estudiar al mismo tiempo, como es el caso de diferentes efectos distractores que ocurren simultáneamente durante la ejecución de las pruebas.

Esta investigación presenta un avance en el área de la ingeniería de transporte, en el área de seguridad vial y comportamiento humano, donde se pueden evaluar las conductas riesgosas al evaluar el uso de nuevas tecnologías como *Whatsapp* y su incidencia en el grado de concentración al momento de conducir y conductas de viaje entre otros.

Capítulo 2. Desarrollo metodológico.

En este capítulo se presenta el desarrollo implementado en esta investigación doctoral, donde se hizo el diseño del experimento, la selección de la conducta a estudiar, la selección y construcción del simulador de conducción, el diseño del escenario de simulación implementado en el experimento, la selección de sensor de actividad eléctrica cerebral, la obtención del grupo de participantes y las especificaciones de las entradas y salidas del modelo a construir.

2.1 Diseño del experimento

Para el diseño del experimento, se siguieron los siguientes pasos para su implementación:

1. Se escogió el efecto distractor a analizar, en este caso el uso de mensajes de texto utilizando la aplicación de mensajería instantánea Whatsapp.
2. Se hizo una búsqueda del simulador de conducción que presentara las mejores características y su costo para la implementación del experimento.
3. Se escogió el escenario de simulación, el cual presentó unas condiciones iguales para todos los participantes del experimento.
4. Se seleccionó el sensor de actividad eléctrica cerebral más adecuado para la toma de datos de los participantes del experimento,
5. Se construyó un simulador de conducción, de acuerdo a las especificaciones del desarrollador del programa, esto debido a los costos del equipo y la imposibilidad de adquirirlo o alquilarlo por encontrarse en el continente europeo.
6. Finalmente, con la información obtenida del simulador y de las ondas cerebrales de los participantes, se construyó el modelo de comportamiento del conductor.

Para entender el uso de los simuladores, se presentarán las ventajas y desventajas de los simuladores de conducción presentan, el síndrome de enfermedad del simulador y finalmente el programa escogido para la ejecución de pruebas de esta tesis doctoral.

Los simuladores de conducción han sido utilizados para explorar aspectos de la conducción desde la década de 1960. Las principales áreas de aplicación de los simuladores de conducción actuales han sido investigar problemas de aceptabilidad de elementos de transporte innovadores (por ejemplo, diseños innovadores, dispositivos en el interior del vehículo), para evaluar el concepto de la seguridad al conducir, (por ejemplo, el posible aumento de accidentes debido al nuevo diseño de una carretera, dispositivos tecnológicos en el vehículo), a la credibilidad y transferibilidad de los resultados del simulador al mundo real, así como a la capacitación de nuevos conductores.

Los simuladores de conducción se han usado como herramientas de investigación en varios campos de la ingeniería civil, mecánica, transporte, psicología y ergonomía tales como: innovadores diseño de vías (por ejemplo, probar el diseño de nuevos túneles, diseños innovadores de trazado geométrico, análisis de congestión de tráfico); sistemas de transporte inteligentes (por ejemplo, nuevos sistemas de navegación, pantallas de visualización frontal con sistemas de entretenimiento); conductores con algún tipo de discapacidad, análisis de comportamiento (comportamiento de conducción afectado por drogas, alcohol, daño cerebral severo, fatiga) y la dinámica y el diseño del vehículo (por ejemplo, pruebas de ABS, tracción en las cuatro ruedas; diseño interior de un vehículo).

De acuerdo con Regan *et al.*, (2008) se enumeran las ventajas y desventajas conocidas sobre los simuladores de conducción:

2.1.1 Ventajas

- Tienen la capacidad de crear escenarios a los conductores en situaciones probables de un accidente sin ocasionar daños, como cuando hay consumo de drogas, cansados, en condiciones climáticas extremas, utilizando nuevas tecnologías, entre otras actividades peligrosas

- Permite controlar muchas variables de confusión que ocurren mientras se conduce, por ejemplo, cuando se utiliza la simulación de conducción (p. ej., clima, tráfico, iluminación, frecuencia de usuarios vulnerables en la vía, viento, hoyos en la vía, proporción de tipos de vehículos, comportamiento inesperado o irracional de otros conductores, entre otros).
- Todos los detalles sensoriales del mundo real no son utilizados por los conductores de todos modos. La información perceptiva (Gibson, 1986) para conducir es conocida y puede ser reproducida de manera fidedigna utilizando simuladores.
- Los escenarios se pueden repetir idénticamente para cada participante del experimento.
- Los simuladores ofrecen ahorros de dinero ya que se puede hacer una configuración flexible para que se puedan plantear una diversidad de preguntas de investigación (Jamson, 2001).
- Los simuladores de bajo costo y baja fidelidad en las manos adecuadas pueden abordar una amplia variedad de interesantes preguntas de investigación.
- La simulación de conducción es convincente y provoca reacciones emocionales de los conductores que son similares en la conducción real.
- Los simuladores son buenos para evaluar el desempeño del conductor o lo que puede hacer un conductor (Evans, 2004).
- Se puede configurar y ejecutar un currículo estructurado para la capacitación de nuevos conductores y para algunas habilidades, transferencias a carreteras reales (Pollatsek *et al.*, 2006)

2.1.2 Desventajas

- Los accidentes simulados no tienen las mismas consecuencias que un accidente real y puede afectar el comportamiento posterior. Los accidentes en un simulador pueden tener un impacto psicológico desconocido en los participantes.
- Las variables de confusión o interacción que ocurren en el mundo real también deben entenderse y, dado que no pueden recrearse completamente en simuladores, no son necesariamente susceptibles de prueba (todavía). Dicho de otra manera, comprender el comportamiento del conductor está en los detalles que interactúan en la simulación.

- Los escenarios reales nunca se pueden reproducir perfectamente (por ahora).
- Cada exposición de conducción afecta las respuestas a exposiciones posteriores.
- Los simuladores de alta gama requieren un hardware de altas especificaciones y el desarrollo de software para abordar un número limitado de preguntas de investigación.
- Los simuladores de bajo costo pueden ser imprecisos e inflexibles y, por lo tanto, abordar todas las preguntas de investigación que puedan surgir.
- Los conductores no creen en la autenticidad de la simulación.
- Los simuladores no pueden abordar preguntas sobre el comportamiento del conductor, ya que el conductor no conduce como lo hace en su propio vehículo (Evans, 2004).
- Se desconoce el grado en que experiencia y habilidades del conductor se transfieren en la conducción en el simulador por lo tanto afecta la relación costo-efectividad de dichos programas (Jamson, 2001).

2.1.3 Fidelidad

La fidelidad se refiere al nivel de realismo inherente al mundo virtual. Cuanto más cerca el simulador se aproxima a la conducción en el mundo real, en términos del diseño y la disposición de los controles, el realismo de la escena visual y su respuesta física, así como los resultados obtenidos, serán de mayor fidelidad (Godley, Triggs y Fildes, 2002; Triggs, 1996). Numerosas dimensiones de fidelidad han sido propuestas, muchas de las cuales se relacionan con las características técnico o físicas del simulador, pero estas características pueden no corresponder necesariamente al grado en que el simulador replica la experiencia de conducción. Rehmann *et al.*, (2010), propusieron que hay cuatro dimensiones interrelacionadas de fidelidad del simulador: fidelidad de equipo, fidelidad perceptual / psicológica, fidelidad ambiental y fidelidad objetiva.

- La fidelidad del equipo se refiere al grado en que el simulador replica la apariencia y sensación del mundo real, en términos del diseño de la cabina del vehículo, tamaño, forma, color y posición del vehículo / controles del sistema.
- La fidelidad ambiental se refiere a la medida en que el simulador se replica señales de movimiento y efectos visuales, y otra información sensorial ambientando el mundo real

- La fidelidad objetiva se refiere al grado en que un simulador replica contraparte en el mundo real en términos de la sincronización de señal dinámica (por ejemplo, sincronización de las señales visuales que coinciden con las entradas del timón de conducción, direccionales, etc).
- La fidelidad perceptiva o psicológica, se refiere al grado en que el conductor percibe que la simulación es una reproducción creíble de la forma de conducción en el mundo real y el grado en que el patrón de interacción del conductor con el entorno de conducción y los controles de conducción del simulador corresponden al mundo real

2.1.4 Validez de la simulación

La validez del simulador generalmente se refiere al grado en que el comportamiento en un simulador corresponde al comportamiento en entornos del mundo real bajo las mismas condiciones (Kaptei *et al.*, 1996; Blaauw, 1982). El mejor método para determinar La validez de un simulador es comparar el rendimiento de conducción en el simulador con rendimiento de conducción en vehículos reales que utilizan las mismas tareas de conducción (Blaauw, 1982). Varios estudios han evaluado la validez del simulador de conducción y han hallado, en general, buenas correlaciones entre el rendimiento de conducción simulado y rendimiento de conducción en carreteras reales (Kaptei *et al.*, 1996; Engstrom *et al.*, 2005).

2.2 Experimentos en simuladores de conducción y la distracción del conductor.

En esta sección, se presenta el estado del conocimiento, incluida una revisión de los estudios de simuladores de conducción y la distracción del conductor. En particular, se analizan los estudios relacionados con la distracción del conductor al conducir en un simulador de conducción y las publicaciones sobre este tema, las investigaciones y resultados cuantitativos, fuentes distractoras, características de las muestras y diseños de los experimentos entre otros A partir del análisis de resultados, se analizaron las conclusiones, fortalezas y debilidades de los estudios existentes y las mejoras para futuros experimentos. Finalmente, se presenta el simulador escogido para el desarrollo de esta investigación doctoral.

2.2.1 Teléfonos celulares

Numerosos estudios han tratado de examinar los efectos relativos del uso del celular sostenido en la mano y el uso del mismo con manos libres sobre el desempeño de la conducción. Los resultados de estas investigaciones muestran por lo general, que el uso de un teléfono celular disminuye el desempeño de la conducción de manera significativa y en respuesta, muchos países han prohibido el uso de teléfonos celulares mientras se conduce (Matthews *et al.*, 2003). Basado en los resultados de numerosos estudios que examinaron teléfonos celulares, los investigadores concluyeron que el principal riesgo asociado con el uso del teléfono celular mientras conducía era la interferencia física, causada por el manejo y manipulación del teléfono (Briem y Headman, 1995; Brookhuis *et al.*, 1991).

Sin embargo, investigaciones posteriores descubrieron que, aunque la distracción física se encuentra asociada con el manejo del teléfono puede presentar un riesgo de seguridad significativo, la distracción cognitiva asociada con el hecho de estar participando en una conversación telefónica también puede tener un efecto considerable sobre la conducción. De hecho, muchos estudios han encontrado que conversar con un teléfono que posee tecnología de manos libres mientras se conduce no es más seguro que usar un teléfono celular (Haigney *et al.*, 2000; Matthews *et al.*, 2003; Redelmeier y Tibshirani, 1997; Strayer *et al.*, 2003).

Con relación a los simuladores de conducción, una serie de estudios han demostrado que el uso de teléfonos celulares tiene consecuencias adversas en el comportamiento del conductor y la probabilidad de estar involucrado en un accidente. Haigney *et al.*, (2000), examinaron los efectos sobre el desempeño de utilizar un teléfono celular usándolo normalmente y utilizando dispositivos de manos libres. Treinta participantes condujeron en cuatro pruebas simuladas, mientras completaban una tarea de razonamiento gramatical diseñada para simular una conversación telefónica por medio de un teléfono celular. Los resultados revelaron que la velocidad media y la desviación estándar de la aceleración disminuyó mientras los participantes conversaban con el teléfono celular.

Strayer *et al.*, (2003) descubrieron que conversar con un teléfono celular utilizando tecnología de manos libres durante la conducción, presentó un aumento en la distancia

de seguimiento a un vehículo líder y este aumento fue particularmente mayor bajo condiciones de alto flujo de tráfico.

Rakauskas *et al.*, (2004) utilizaron un simulador de conducción para determinar el efecto de conversaciones telefónicas sencillas y complicadas sobre el desempeño de la conducción, y descubrieron que el uso del teléfono celular causó que los participantes tuvieran una mayor variación en la posición del pedal del acelerador. Los participantes condujeron más despacio con mayor variabilidad en la velocidad y reportaron un mayor nivel de stress, independientemente del nivel de dificultad de conversación

Por otro lado, Poda *et al.*, (2007) examinaron el impacto de la conversación telefónica sobre la conciencia de la situación y el rendimiento de conductores novatos y experimentados. El desempeño de 25 conductores novatos y 26 conductores profesionales fue medido por el número de infracciones de conducción cometidas, como exceso de velocidad, impactos, peatones golpeados, señales de alto omitidas y cruzar línea central y del borde de la carretera. Los resultados indicaron que los conductores novatos cometieron más infracciones mientras conducían y eran menos conscientes de la situación que sus experimentados contrapartes durante la conversación desarrollada por el teléfono celular.

Bruyas *et al.*, (2009) investigaron que el efecto de realizar una conversación asincrónica (usando un teléfono de respuesta en lugar de un teléfono celular) reduce el impacto negativo de llamadas telefónicas, ya que la comunicación en esta ocasión está bajo la dirección del conductor, lo que le permite controlar mejor la interacción. Los resultados mostraron mejores puntuaciones para respuestas correctas a estímulos para el contestador telefónico que para comunicaciones telefónicas, aunque tiempos de respuesta fueron mayores en ambas condiciones de comunicación que en la conducción sin comunicación

Shinar *et al.*, (2005) encontraron que una práctica basada en un simulador de doble tarea de 96 minutos, distribuido durante 5 días, fue suficiente para eliminar el impedimento de conducción usando el teléfono celular en un grupo de conductores experimentados. En particular, el aprendizaje de doble tarea fue principalmente observado en las desviaciones medias y estándar de la posición del carril, el ángulo de dirección y la velocidad. Además, el aprendizaje fue mayor cuando se conducía junto con una tarea de matemáticas en

lugar de una conversación natural. A partir de estos resultados, Shinar *et al.*, (2005) concluyeron que la investigación de manejo previa probablemente sobreestimó el comportamiento de conducción en el mundo real del mundo real al forzar el ritmo de conducción, utilizando La conversación antinatural sustituta y que no se repite la condición al conducir.

La deficiencia en la conciencia de la situación con respecto al tráfico circundante fue descubierta por Ma y Kaber (2005). Los autores compararon el impacto del uso de teléfonos celulares mientras conducían con el uso del sistema adaptado de control de cruce y descubrieron que el uso del teléfono condujo a una reducción significativa en el conocimiento de las situaciones percibidas y un aumento significativo del trabajo mental percibidas por los conductores.

Beede y Kas (2006) utilizaron un simulador de conducción para medir el impacto en la conducción con el desarrollo de conversación de un teléfono celular usando tecnología de manos libres y un detector de señal de tarea mientras se conduce. Las medidas de desempeño de conducción en términos de infracciones de tráfico, maniobrabilidad en la conducción, lapsos de atención y tiempos de respuesta fueron significativamente bajos cuando los participantes hablaron por el teléfono celular. Además, conversar con el teléfono celular y el detector de la señal aumentaron simultáneamente la velocidad promedio, el número de lapsos de atención y se redujo la variabilidad en las maniobras relacionadas con la velocidad.

McKight y McKight (1993) usaron una secuencia de conducción de video que incluía un total de 45 escenas de tráfico en la carretera. 150 participantes fueron evaluados en 5 condiciones: hacer una llamada de teléfono celular, entablar una conversación que sea casual o intensa, sintonizar una emisora de radio o simplemente responder a los escenarios de tráfico. Los autores encontraron que los participantes en todas las condiciones no respondieron a los eventos de tráfico. En particular, el grupo más viejo de conductores era más vulnerable a las demandas multitarea. El grupo más joven de participantes también mostró una disminución en su capacidad para responder a escenarios de tráfico, pero fueron más profundas las condiciones de las conversaciones telefónicas.

Schlehofer *et al.*, (2010) exploraron predictores psicológicos del uso de teléfonos celulares mientras se conducía, para 69 estudiantes universitarios que primero completaron una encuesta y predijeron su rendimiento de conducción con y sin una conversación simultánea por teléfono celular y finalmente, conduciendo sobre el simulador de conducción. Reimer *et al.*, (2010) examinaron el impacto de las distracciones en los conductores adultos jóvenes con trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH).

Los resultados mostraron que, conductores con TDAH presentaron más dificultades al operar el teléfono, pero no mostraron un aumento o disminución en el rendimiento de conducción mayor que el control de los participantes. En contraste los participantes con TDAH mostraron una disminución mayor en el rendimiento de conducción que controles durante una tarea secundaria en una configuración de baja demanda

2.3 Selección de la conducta a estudiar (distracción por recepción de mensajes de texto en el celular).

Uno de los factores que más ocasiona distracciones en los conductores en la actualidad, de acuerdo con la clasificación de riesgos percibidos específicamente en el uso del teléfono celular, a partir de los estudios realizados por Patel *et al.*, (2008). Concretamente el autor se centrará en la aplicación de mensajería instantánea *Whatsapp*.

Whatsapp es una compañía que fue creada en 2009, enfocada a la mensajería instantánea para celulares inteligentes o *smartphones*. Esta aplicación permite el envío de mensajes escritos, mensajes de voz, imagen y video. Adicionalmente permite el uso de llamadas y videollamadas si se encuentra conectado a una conexión de internet. En los últimos años, se ha masificado el uso de esta aplicación por parte de los conductores, generando así un factor distractor que puede incrementar los accidentes de tránsito.

Con relación al uso de dispositivos móviles, se presentan a continuación los resultados obtenidos por diferentes investigadores.

Ortiz et. al (2018), Estudiaron el efecto de escribir mensajes de texto por Whatsapp mientras conducían. Se tomó una muestra de 75 participantes para evaluar las asociaciones entre la función visual y la conducción. En este estudio se hizo una simulación mientras se enviaban mensajes de texto. El análisis indicó que los cambios funcionales que ocurren con la edad, como menor sensibilidad al contraste y mayor luz de la retina se correlacionaron con un mayor número de colisiones, distancias más largas conducidas fuera del carril y mayor desviación estándar de la posición lateral. Los resultados, Además, enviar mensajes de texto a *WhatsApp* mientras conduce empeora el rendimiento de conducción para todos los grupos de edad, especialmente entre participantes mayores. Por último, las respuestas subjetivas de los participantes indicaron que los conductores más jóvenes (18–24 años) tenían un mayor riesgo de violar deliberadamente las prácticas de manejo seguro.

Por otro lado, Khan et. al, (2019), en su investigación, identificaron a los conductores que conducen con riesgo y evaluaron el comportamiento a través del análisis de las variaciones en el vehículo cuando se usa un teléfono inteligente mientras se conduce. Estas las variaciones han sido capturadas de manera efectiva usando un teléfono inteligente y tecnologías sensoriales vehiculares. Un marco llamado "AutoLog" que utiliza OnBoard Diagnostic-2 (OBD2) y sensores de teléfonos inteligentes para capturar las actividades del teléfono inteligente del conductor junto con los datos del vehículo.

Los autores capturaron ciertos parámetros esenciales que podrían usarse para analizar el comportamiento de conducción. Un mensaje de alerta puede ser generado por la realización de actividades de riesgo en un teléfono inteligente o cualquier actividad mientras conduce. Los resultados muestran que realizar actividades con teléfonos inteligentes, es decir, hacer llamadas y enviar mensajes de texto mientras se conduce, de repente, degradan la velocidad y se encontró cambio abrupto en el conductor, lo cual llevó a la desviación dentro del carril que pueden causar accidentes.

De manera similar, Jovović et al., (2018) analizaron el desarrollo y la aplicación de equipos y servicios modernos de información y comunicación (ICES por sus siglas en inglés). observando los aspectos positivos y negativos de su uso y su evolución. Uno de los problemas que encontraron fueron las nuevas fuentes de distracción del conductor, lo que en última instancia resulta en una amenaza diaria grave y creciente para la seguridad del

tráfico. Simultáneamente con el desarrollo de ICES, el número de distractores (dispositivos terminales móviles, computadoras portátiles, relojes inteligentes y otros) también ha aumentado, reduce el nivel de seguridad y afecta la calidad de la conducción. Con el aumento en la adquisición de dispositivos móviles, así como la implementación de modernos sistemas de información y comunicación multimedia en vehículos, intensificará este problema aún más en los próximos años. El factor desfavorable proviene del hecho de que los factores de distracción influenciados por el uso de ICES pertenecen a categorías biomecánicas, cognitivas, auditivas y visuales, que afectan directamente las funciones humanas esenciales para la operación exitosa y segura del vehículo.

Oviedo et. al., (2019), analizaron el uso de teléfonos celulares y el riesgo de accidentes por el cambio del comportamiento en el uso de aplicaciones que han sido desarrolladas con la intención de utilizar la tecnología para prevenir accidentes. A pesar del potencial que tienen estas aplicaciones, asociadas a la distracción del conductor, aún no se han explorado los problemas emergentes que se presentan.

La investigación consistió en la evaluación de 29 solicitudes relevantes en idioma inglés fueron identificados La mayoría de estas aplicaciones se centraron en bloquear funciones específicas del teléfono. (p. ej., mensajes de texto o llamadas) al tiempo que permite que las funciones de teléfono de conducción más deseadas para acceder (por ejemplo, aplicaciones de música y funciones de GPS). Las funciones específicas que fueron bloqueadas o permitidas varían mucho entre aplicaciones. Una limitación importante de las aplicaciones era su dependencia del bloqueo de teléfonos específicos. Bloquear las funciones del teléfono puede no ser atractivo para los conductores que ven su teléfono como una necesidad. Como tal, es poco probable que se utilicen estas aplicaciones de control mientras conduce. Las aplicaciones de teléfonos inteligentes diseñadas para evitar el uso del teléfono mientras se conducen muestran el potencial para jugar un papel importante en un sistema intervención, para evitar la distracción del conductor.

Finalmente, Winskel et. al., (2019) analizaron el uso de teléfonos inteligentes entre los estudiantes universitarios que es generalizado y una práctica común mientras se estudia. Sin embargo, el uso puede conducir a costos de rendimiento académico. Este estudio examinó la relación entre el uso de teléfonos inteligentes durante el estudio, el uso problemático de teléfonos inteligentes y el rendimiento académico en estudiantes universitarios coreanos y australianos.

119 estudiantes coreanos y 270 australianos de entre 18 y 26 años completaron una encuesta compuesta por cuestionario de uso de teléfonos inteligentes, escala de adicción a teléfonos inteligentes y autoinforme de su promedio académico actual

Los autores descubrieron que el uso de teléfonos inteligentes y los problemas en el desempeño académico era significativamente mayor para los coreanos en comparación con los estudiantes australianos. Se encontró una relación positiva entre el uso de teléfonos inteligentes y el desempeño académico. Para los estudiantes australianos, se encontró una relación negativa entre el uso de teléfonos inteligentes y el promedio académico. Los resultados indican que el uso de teléfonos inteligentes y la propensión a la adicción a los teléfonos inteligentes son actualmente más altos para los estudiantes coreanos en comparación con estudiantes australianos. Además, cuanto más tiempo pasa un estudiante usando su teléfono inteligente, más riesgo corre en disminuir su desempeño académico y un aumento en los problemas generados por el teléfono celular.

Como se puede observar los tópicos expuestos anteriormente, son factores relevantes que son útiles para plantear un modelo de comportamiento del conductor, que permita analizar las causas que ocasionan accidentes de tránsito, con el fin de tomar acciones relacionadas a la disminución de fatalidades debidas a la distracción de mensajería instantánea *Whatsapp*.

Whatsapp se ha convertido en los últimos años, en una fuente inagotable de transmisión de mensajes de todo tipo, audios, videos, llamada, videollamada y la gente en general, está acostumbrada al uso de esta plataforma. Los conductores no están exentos al uso de esta plataforma, que es usada para recibir localizaciones de destino, recibir y hacer llamadas sin gastar minutos de sus planes de telefonía móvil, y que en muchos casos tienen paquetes de datos ilimitados ofrecidos por los prestadores del servicio, al igual que las videollamadas, con lo cual se está ocasionado un efecto distractor que es importante evaluar debido al incremento en la accidentalidad de vehículos en las carreteras tanto rurales como urbanas.

Esta investigación doctoral se centra en el envío de mensajes por medio de esta plataforma tecnológica, mientras los participantes conducen en un escenario controlado. Para tal fin se enviaron de manera aleatoria durante el escenario de prueba un promedio de 20

a 30 mensajes por minuto, durante un lapso de 10 minutos, para analizar los cambios de concentración de conductores al recibir mensajes, escuchar las notificaciones y sentir la vibración del celular mientras conducen.

2.4 Elección del simulador de conducción

De acuerdo con lo presentado en el tópico anterior, se hizo un análisis con diferentes simuladores de conducción que permitieran evaluar el desempeño de los conductores mientras se ejecutaba la prueba. Entre otros, se evaluó el costo del *software*, el desempeño, la robustez de la ejecución de procesos, el procesamiento de imágenes en realidad virtual y el soporte técnico postventa para el uso de este.

El *software* seleccionado y utilizado en esta investigación doctoral fue suministrado por la firma Foerst Simulation GmbH, desarrollado en Alemania y es utilizado por escuelas de conducción y por agencias gubernamentales como policía, bomberos, emergencias médicas entre otros, para capacitar a sus funcionarios en la conducción de vehículos livianos y pesados en diferentes escenarios. La figura 12 muestra un simulador de conducción construido por el proveedor.

Entre otros aspectos técnicos, cuenta con una silla de conductor ajustable, un timón de 27 cm de diámetro, pedales (freno, acelerador, clutch) tablero de instrumentos y dos espejos retrovisores externos y uno central que aparece en las pantallas laterales y en la pantalla principal, que permiten mostrar en tiempo real objetos y eventos que están sucediendo detrás del 'vehículo'. Los controles disponibles para el conductor son: 6 cambios de velocidad más reversa, luces direccionales, limpiaparabrisas, luces, bocina o pito y botón de encendido.

Figura 5. Modelo de simulador de conducción.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

En el computador se instala el programa de simulación de conducción desarrollado por Foerst Simulation, el cual incluye la dinámica de la conducción, generación de ruido, generación de gráficas, bases de datos, objetos virtuales, escenarios de conducción, entrenamiento, menú de control, y la adaptación del usuario a las condiciones de conducción y finalmente la evaluación en la conducción.

2.4.1 Dinámica de conducción

Las características de un vehículo real son simuladas. Cualquier parámetro como velocidad máxima, aceleración, desaceleración en el frenado, masa del vehículo, características de torque/ revolución del motor, relación de transmisión, potencia máxima, y la resistencia al viento son modificables. También se calculan las aceleraciones longitudinales y laterales. A una aceleración centrífuga excesiva en las curvas, los neumáticos se desplazan hacia el exterior, evitando que la barrera lateral de seguridad pueda ser impactada.

2.4.2 Generación de gráficos

Resolución de imagen de 1920 x 1080 píxeles por canal, profundidad de color de 24 bits (color verdadero). Las imágenes tienen mapeo de texturas con antialiasing en las imágenes, para mayor claridad en el muestreo de imágenes.

Base de datos

El mundo virtual comprende carreteras rurales, de montaña y urbanas, autopistas. Los cursos incluyen cruces, semáforos, señales de tráfico, elevaciones y caídas, bosques, entradas y salidas de autopistas.

La complejidad de la red de carreteras está limitada a 2 carriles por dirección en intersecciones y 3 carriles por dirección en autopistas.

Objetos virtuales

El sistema ofrece casas, ciudades, árboles, muchos extras, señales de tráfico, peatones animados y animales. También se presentan automóviles, camiones, autobuses, motocicletas, ciclistas y otros vehículos.

Espejos retrovisores

Las imágenes para el espejo exterior izquierdo y el derecho se generan y se muestran en las pantallas que usa el simulador, mostrando todos los objetos virtuales desde la parte posterior y se ven los objetos que ingresan y desaparecen del cono visual del conductor.

Figura 6 Uso de los espejos retrovisores.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Repeticiones y diagramas

El simulador ofrece la posibilidad de mostrar una repetición completa del último escenario conducido. Existe la opción en el programa de avanzar rápido, retroceder rápidamente, parar y reproducir. El punto de vista se hace desde un helicóptero. Además, el simulador puede mostrar diagramas de los parámetros más importantes durante la reproducción (si se solicita también durante el viaje)

Figura 7 Repeticiones y datos de la simulación.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Tráfico

El tráfico incluye al menos 30 usuarios en la carretera con inteligencia artificial, que comprenden automóviles, camiones, peatones y ciclistas, que pueden aparecer al mismo tiempo en el cono de visión del conductor. Ellos observan las normas de tráfico, la distancia a los vehículos y los límites de velocidad, se detienen antes de las luces rojas de los semáforos y cruces de tráfico, aceleran y desaceleran de forma natural y pueden adelantar vehículos. El programa permite poner obstáculos en el escenario con tiempo crítico para causar reacciones repentinas. Colisiones entre el propio automóvil y otra carretera

Diagnóstico por computadora

Cualquier información técnica de entrada y salida se muestra en una tabla de diagnóstico en el menú a solicitud del usuario.

Figura 8 Simulación de conducción.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Currículo y Escenarios

Esta sección brinda una breve descripción de los escenarios implementados. Las descripciones se centran en los objetivos educativos. Los detalles de las implementaciones de escenarios dependen del nivel de dificultad y la versión del país.

El simulador ofrece los siguientes módulos de escenario:

- Entrenamiento básico
- Entrenamiento avanzado
- Seguridad vial (Conciencia sobre riesgos y simulaciones de alcohol)
- Maniobrando con Tráiler
- Eco-Entrenamiento
- Deportes de motor
- Conducción libre.

Figura 9 Módulo de escenario de conducción en ciudad.



Fuente: Foerst Simulation GmbH,2017

Figura 10 Módulo de escenario de conducción en autopista.



Fuente: Foerst Simulation GmbH,2017

Figura 11 Módulo de escenario de conducción en diferentes condiciones de día y clima



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

El programa "Seguridad vial" está destinado a ser utilizado para el entrenamiento de percepción de peligros. Para este fin, ofrece un conjunto de escenarios que presentan situaciones críticas en diversos entornos. El controlador está obligado a reaccionar para evitar un accidente. Usando una simulación de alcohol, los escenarios de tráfico y las situaciones de peligro contenidas se pueden usar para demostrar los peligros de conducir bajo la influencia del alcohol.

Todos los escenarios adicionales se pueden combinar con las siguientes condiciones climáticas: soleado, amanecer, noche, lluvia, niebla o nieve.

Los trayectos de conducción comprenden varias situaciones de peligro entre otros

- Animales en el camino
- Peatones cruzando la calle
- Inicio de estacionamiento de autos
- Daños en la carretera

- Situaciones poco claras con vista limitada
- curvas ciegas

Las situaciones de peligro único también se pueden seleccionar por separado.

(Duración unos 30 segundos)

Figura 12 Simulación de conducción real.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Puntuación:

Al final de cada escenario de seguridad vial, se calculará un "Puntaje" y se mostrará en la tabla de evaluación.

Con una base del 100% se van restando puntos por cada error durante el viaje. En la parte inferior, el puntaje está limitado al 0%. Durante el viaje, el instructor puede "congelar" el trayecto y después de un evento se proporciona información como tiempo de reacción, distancia de parada, entre otros.

Figura 13 Puntuación finalizada la conducción.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Entrenamiento ecológico

El programa de simulación permite el cálculo permanente y la visualización del combustible actual y promedio

Consumo durante un viaje de simulación.

Se pueden entrenar las siguientes técnicas para una conducción con consumo eficiente de combustible:

- superar el corte de combustible por el frenado del motor al desacelerar
- cambio temprano de marcha, utilizando la marcha más alta posible cuando se conduce cuesta arriba
- evitar maniobras innecesarias de frenado y aceleración
- estilo de conducción anticipada

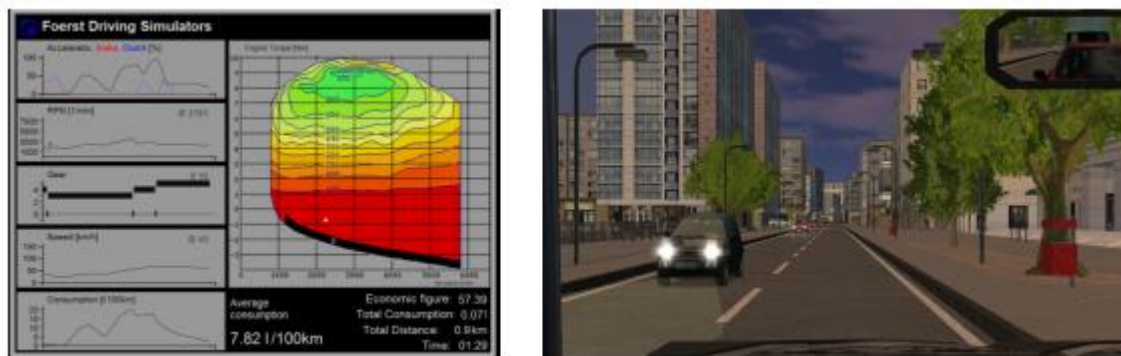
Viajes en la ciudad, en el área suburbana, en un camino rural, una autopista y en las montañas están disponibles. El consumo de combustible del automóvil de clase media simulado se calcula en función del par motor y las revoluciones por minuto.

La posición del pedal del acelerador, la velocidad y el consumo actual de combustible se muestran esquemáticamente como funciones del tiempo. El consumo promedio de combustible también se calcula y muestra constantemente. El consumo de combustible específico (es decir, el consumo de combustible en relación con la potencia de salida) se muestra como un punto en el mapa del motor a la derecha de los otros diagramas.

El mapa del motor visualiza por medios gráficos el hecho físico de que los motores de combustión funcionan de manera más eficiente a bajas revoluciones por minuto y válvula de mariposa casi abierta. Los ejes representan las revoluciones por minuto y la presión media del pistón. Este último es proporcional al par motor. Las líneas azules que se muestran en los monitores son líneas de consumo de combustible específico constante. Las áreas entre ellos son de color verde para bajo consumo a rojo para alto consumo.

Un pequeño cuadro de marcador muestra el punto de trabajo actual del motor según lo determinado por el estilo de conducción del aprendiz. Al observar el movimiento del punto de trabajo, uno puede ver cómo el estilo de conducción influye en el consumo de combustible. El consumo no solo aumenta al aumentar la velocidad, sino que también disminuye al elegir cambios de la caja de transmisión más altos. Seleccionando cuidadosamente la combinación correcta de torque y revoluciones por minuto cuando acelerando o yendo cuesta arriba, es posible ahorrar combustible mientras se mueve rápidamente

Figura 14 Datos de información del motor mientras se conduce.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Deportes de motor

Con la ayuda del simulador Foerst, los conductores pueden aprender cómo manejar un vehículo en condiciones extremas. El simulador ofrece la opción entre una carrera de fórmula 1 de última generación con curvas estrechas, caídas y elevaciones o un camino rural bloqueado, que es más fácil de manejar.

La capacitación le da al conductor una buena visión de la física de la conducción y ayuda a desarrollar un estilo de conducción experimentado y constante en todas las situaciones, una contraparte de la cual los aprendices de manejo no pueden acceder fácilmente.

Algunos de los aspectos de la física de la conducción, que pueden mostrarse utilizando el programa Motorsports son:

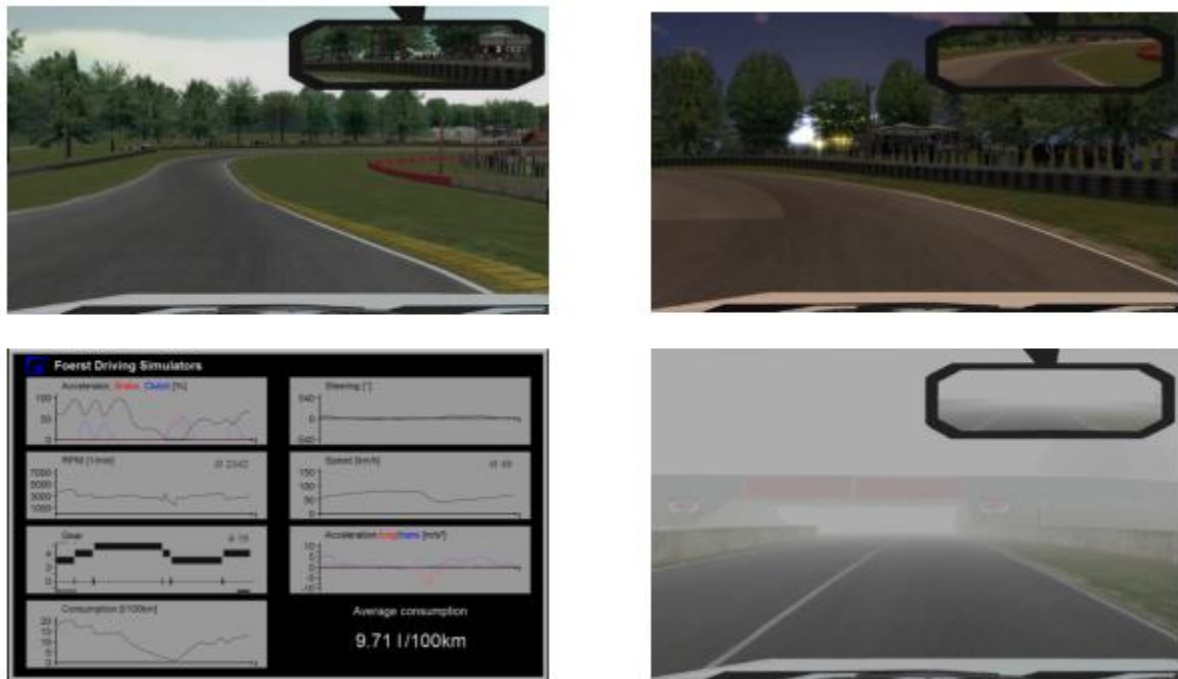
- Pérdida del agarre en carretera debido a las fuerzas centrífugas
- Pérdida del agarre de la rueda debido a la aceleración y desaceleración
- Interacción entre las fuerzas laterales y longitudinales (las fuerzas de aceleración reducen el soporte lateral y el viceversa).

Cabe señalar que conducir bajo condiciones extremas revela algunas restricciones fundamentales de los simuladores de conducción, ya que las fuerzas en el conductor no se pueden sentir en toda su extensión como en la realidad. Esto conduce a una subestimación sistemática de la verdadera velocidad del propio vehículo, lo que hace más difícil sentir los límites del simulador del automóvil que en la realidad.

Este problema se aborda parcialmente mediante una ligera exageración de la inclinación del automóvil. Sin embargo, en el simulador es más difícil ir a los límites que en la realidad y es más fácil cruzar estos límites. Por el aspecto divertido, por lo tanto, ofrecen un tipo especial de "neumático o llanta" con un contacto de carretera irrealmente bueno.

Se encuentran disponibles carreras en dos circuitos diferentes de carreras con 12 o 24 oponentes. Todos los paseos se pueden combinar con las siguientes condiciones climáticas: soleado, lluvia, niebla, noche y amanecer.

Figura 15 Ejemplos de simulación con diferente clima



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Conducción libre

"Conducción libre" significa que no tiene que obedecer un plan de estudios de capacitación o está expuesto a una evaluación de estado físico, pero que puede elegir la velocidad y el seguimiento por su cuenta. Varios parámetros para el conductor pueden ser ajustado en el menú.

El programa "Conducción libre" ofrece las siguientes opciones:

- Varios cursos.
- Varios puntos de partida
- Varias condiciones de la vista y la superficie de la carretera
- Densidad de tráfico

El mundo virtual comprende carreteras rurales, de montaña y urbanas, autopistas. Los cursos incluyen cruces, semáforos, señales de tráfico, elevaciones y caídas, bosques, entradas y salidas de autopistas.

Figura 16 Ejemplos de simulación en vía rural y vía urbana.



Fuente: Foerst Simulation GmbH, 2017

Restricciones generales de los simuladores de conducción

Las siguientes afirmaciones son válidas para cualquier simulador de conducción. Son independientes de una marca especial o fabricante.

Advertencia de kinetosis:

Los simuladores de manejo pueden causar un tipo de mareo llamado kinetosis. Los productores de simuladores intentan minimizar este efecto, pero no se puede evitar por completo.

Limitación de la complejidad:

Siempre habrá una brecha entre "realidad virtual" y "realidad". La completa complejidad del tráfico real no puede ser igualada con un simulador no se puede alcanzar el entorno gráfico, el comportamiento del tráfico y la retroalimentación forzada. Existen varias normas para la citación bibliográfica. Algunas áreas del conocimiento prefieren normas específicas para citar las referencias bibliográficas en el texto y escribir la lista de bibliografía al final de los documentos. Esta plantilla brinda la libertad para que el autor de la tesis utilice la norma bibliográfica común para su disciplina. Sin embargo, se solicita que la norma seleccionada se utilice con rigurosidad, sin olvidar referenciar "todos" los elementos tomados de otras fuentes (referencias bibliográficas, patentes consultadas, *software* empleado en el manuscrito, en el tratamiento a los datos y resultados del trabajo, consultas a personas (expertos o público general), entre otros).

El material utilizado en este experimento se describe en el siguiente listado:

- Sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky MindWave mobile 2, utilizada para captar las ondas cerebrales
- Matlab, para grabar y registrar las señales captadas por la diadema Neurosky
- Foerst Simulation, programa para hacer la simulación de conducción.
- Equipo de simulación compuesto de: Simulador de autos estático: Procesador Intel Core I7 7700ATX - Board MSI-H110M - 16GB DDR4 - 1 TERA HDD-Unidad DVD-RW, Teclado y Mouse, Disco de estado sólido: Unidad SSD ADATA SPP550 - 240GB, Tarjeta gráfica: PNY GTX 1070 TI 8GB DDR5, Bluetooth, Timón y pedales Logitech modelo G29 con adaptador para timón de vehículo de calle, Chasis en tubería estructural, hecho en tubo cuadrado, con soporte de silla y corredera, timón pedales y caja con ajuste gradual y soporte de pantalla, sonido, acabado en pintura electro estática, Televisor LED SAMSUNG 32" - UN32J4000DKXZL, parlantes Logitech Z506 - 5.1 CH. Este simulador fue construido por el autor del proyecto para la realización de esta investigación doctoral.
- Celular marca Alcatel modelo U5

Figura 17 Simulador de Conducción utilizado en la investigación



2.4.3 Escenario de conducción

Para acondicionar el experimento, se plantearon las siguientes variables:

- Escenario 6:00 PM a 7:00 PM
- Entorno urbano con tráfico de hora pico
- Simulación de ir dentro del vehículo (135°)
- Personas y animales
- Complejidad de la geometría de las vías
- Complejidad del escenario
- Tráfico mixto
- Tipos o eventos que ocurren en el escenario

2.4.4 Preparación antes de la prueba

Antes de la ejecución de la prueba, se presentaron las siguientes dificultades para la implementación del experimento:

- Participantes para construir la prueba
- No entender el uso del simulador
- Confundirse con los controles
- Desconfianza
- Tiempos de espera
- Varios participantes no entendían que iban conduciendo dentro del vehículo
- Hubo gente que no pudo hacer la prueba
- Sobreestimación de incidentes, accidents

Minutos previos a la prueba

- Adecuación del escenario
- Presentar licencia de conducción
- Consentimiento notificado
- Desinfección del sensor
- Explicación de la prueba
- Desinfección y entrega de un celular
- Desinfección de silla, timón y palanca de cambios

Tabla 4 Listados de errores de conducción obtenidos en el experimento

Matriz	Type	Descripción
1	3	Accidente
2	4	Errores en el margen de la carretera
3	5	Hecho caso omiso a la luz rojo
4	7	Demasiado rápido
5	8	Hecho caso omiso de la preferencia de paso
6	9	Luces no encendidas
7	10	Ha puesto las luces de carretera
8	12	No ha accionado el intermitente en el cambio de carril
9	14	Rebasado la línea de la carretera
10	16	Proceso de cambio de marcha no permitido
11	19	Viaje cancelado
12	21	Adelantado por el carril erróneo
13	22	Sobrepasado límite de velocidad
14	24	Distancia al vehículo de delante demasiado escasa
15	26	Lado del carril erróneo
16	35	Número de revoluciones demasiado elevado
17	37	Motor calado o apagado
18	40	No ha quitado el freno de mano
19	44	Abandonado la vía
20	45	Puesto en peligro a los usuarios de la vía pública
21	46	Ha accionado el intermitente erróneo en el cruce
22	74	Hecho caso omiso a la señal de STOP
23	93	Dirección prohibida, ignorado flecha de dirección
24	100	Número de revoluciones demasiado pequeño
25	101	Cambio de marcha sin pisar el embrague
26	103	Fin del viaje
27	119	Número elevado de revoluciones por cambio de marcha erróneo
28	120	Bajo número de revoluciones por cambio de marcha erróneo
29	121	Motor calado por cambio de marcha erróneo
30	155	Pise el embrague antes de presionar el botón de arranque

Como se puede observar, los errores más comunes que presentaron los sujetos son accidentes de tránsito, errores de conducción a la orilla de la carretera, no respetar los semáforos en rojo, ir demasiado rápido, rebasar la línea del borde de la carretera, adelantar por el carril contrario, conducir por el carril contrario, no quitar el freno de mano, poner en peligro a los usuarios de la vía, no utilizar las direccionales, hacer caso omiso de la señal

pare, sobrepasar el límite de velocidad e ir en dirección prohibida ignorando la flecha de la dirección. Dependiendo los valores obtenidos en el análisis de las neuronas, si el valor es alto o bajo, el conductor va concentrado y el mensaje de *Whatsapp* lo distrajo o el conductor va desconcentrado y el mensaje influyó a un mayor grado de desconcentración; por otro lado, si el valor es positivo, el conductor está concentrado mientras conduce y si es negativo, el conductor va desconcentrado. Con base en lo anteriormente explicado, se observan los errores más comunes cometidos por los conductores.

La Figura 18 muestra a un sujeto realizando la prueba de conducción y se puede ver como tiene instalada la diadema Neurosky en la cabeza, la cual está midiendo la actividad cerebral simultáneamente mientras realiza la prueba.

Figura 18 Diadema Neurosky instalada en la cabeza de un conductor



En la Figura 19 se observa otra perspectiva de un sujeto durante la prueba de conducción

Figura 19 Conductor de camión



En la Figura 20 se puede observar la diadema instalada en la frente del conductor.

Figura 20 Otro punto de vista de la conducción en el simulador



En la Figura 21 se muestra el escenario de conducción en vía urbana, el cual fue el mismo para los 167 sujetos que participaron en el experimento.

Figura 21 Escenario de conducción en vía urbana



La Figura 22 muestra la participación de un sujeto de 82 años en la investigación doctoral. El sujeto en la actualidad conduce su vehículo sin ninguna restricción.

Figura 22 Participante hombre de 82 años conduciendo en el simulador



En la Figura 23 se muestra la participación de una participante de 90 años en la investigación doctoral.

Figura 23 Participante mujer de 90 años conduciendo en el simulador



2.5 Diseño del escenario de simulación (escenario de conducción + generador de mensajes de texto)

El escenario para ejecutar la prueba de conducción fue el mismo para los 167 participantes del experimento. La zona urbana presenta andenes, zonas comerciales, zonas de parqueo a la orilla de la vía, gasolineras, señales de tránsito y gloriets a lo largo del desarrollo de la ruta. Las pruebas se realizaron en la ciudad de Bogotá en el Club Militar, en la Alcaldía de Cajicá, en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada en el campus Nueva Granada de Cajicá y en la Alcaldía de Sopó.

El experimento consiste en hacer una prueba de conducción controlada en un simulador, con el cual se pretende evaluar el comportamiento de los conductores a determinados escenarios y factores distractores que afecten el grado de concentración y puedan ocasionar accidentes de tránsito. La población estudiada son hombres y mujeres entre los 16 y los 90 años de edad, que tengan licencia de conducir vigente y no tengan ningún tipo de enfermedad física o desorden cognitivo.

En este apartado se presenta un resumen del análisis de los modelos de comportamiento existentes de conductores para poder compararlos con la información obtenida a partir de

las mediciones en situaciones simuladas, esto con el fin de hallar elementos comunes y/o metodologías que permitan configurar el experimento y posteriormente, definir el modelo de comportamiento del conductor. La tabla 5 muestra el resumen de los análisis de uso de simuladores y celulares.

Tabla 5 Comparativo de estudios de simuladores de conducción y uso de celulares.

Autores	Objetivos de la Investigación	Muestra poblacional	Resultados
Haigney <i>et al.</i> , (2010)	Efectos del desempeño de usar celular con manos libres mientras se conducen en el simulador	30 participantes	La velocidad media y la desviación estándar de la aceleración disminuyen mientras se habla por el celular.
Kass <i>et al.</i> , (2007)	Impacto de la conversación telefónica sobre la conciencia de la situación y rendimiento de conductores novatos y experimentados	25 conductores novatos y 30 experimentados	Los conductores novatos cometieron más infracciones mientras conducían que conductores expertos
Shinar <i>et al.</i> , (2005)	Práctica en simulador de conducción de doble tarea con conversaciones de celular	30 conductores experimentados	Se sobreestimó el comportamiento de conducción en el mundo real al forzar el ritmo de la conducción
McKight y McKight (1993)	Secuencia de conducción de video de 45 escenas de tráfico y el uso del celular.	150 participantes	Grupo más viejo es más vulnerable a ñas demandas multitarea. El grupo más joven se comportó igual, pero se vió afectado por las condiciones de las conversaciones telefónicas
Schelehofer <i>et al.</i> , (2010)	Predictores psicológicos en el uso de celulares mientras se conducía	69 participantes	Predijeron el desempeño al conducir a partir de encuestas con y sin el uso del celular y conduciendo en un simulador de conducción
Reimer <i>et al.</i> , (2010)	Impacto de las distracciones de los conductores jóvenes con el trastorno TDAH y el uso del celular.	63 participantes	Los conductores con TDAH presentaron más dificultades al operar un celular mientras conducían en el simulador, pero no mostraron aumento o disminución en el rendimiento de la conducción mayor que el grupo de control del experimento.
Ben-Bassat y Shinar (2011)	Comportamiento y percepción de conductores en las vías y los efectos distractores.	22 participantes, 11 mujeres y 11 hombres.	Efectos en el cambio del comportamiento del conductor al volante cuando hay cambios en la geometría de la carretera y cuando se instalan y retiran barreras de seguridad a la orilla y mediana de la carretera

3.1 Selección y configuración del sensor de actividad eléctrica cerebral EEG para medir concentración

De acuerdo con la búsqueda de sensores de actividad eléctrica cerebral, su costo varía de acuerdo al número de sensores que utilice. Ante tal restricción, se hizo la evaluación de utilizar el sensor marca Neurosky Mindwave 2.

3.2 Investigaciones relacionadas con el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky

Como soporte al uso del sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky en esta investigación doctoral, se resumen tres investigaciones relacionadas con el uso de este sensor de actividad eléctrica cerebral EEG y los aportes a la investigación en diferentes áreas del conocimiento.

Rajan *et.al.*, (2017), analizaron los accidentes de tránsito que ocurren cuando un conductor tiende a dormirse por fatiga mientras conduce. El estado de sueño del ser humano se divide en cinco etapas. La principal causa de accidentes es el estado de fatiga del conductor. Se afirma que las señales del cerebro obtenidas a partir de un electroencefalograma (EEG), refleja el estado de fatiga. La sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky Mindwave se utiliza para capturar las ondas cerebrales. Es un dispositivo portátil y, a su vez, está conectado a un computador o dispositivo móvil que ayuda a monitorear el proceso. Esta investigación estudió la detección del estado de fatiga y el análisis de las ondas cerebrales.

La interferencia se reduce por la parada de banda, la transformación de Hilbert-Huang y el filtro de mediana. El porcentaje de densidad espectral de potencia produce el valor propio. Los resultados del experimento producen la intensidad de la señal, los valores de las ondas cerebrales, los resultados de la transformada rápida de Fourier, FFT, que es un algoritmo para agilizar la transformada de Fourier discreta en tiempo y la señal sin procesar, para detener a conductores que presenten fatiga o poder informar a la policía para poder hacer un rastreo de vehículos.

Por otro lado, Ülker *et al.*, (2017), analizaron las ondas cerebrales mediante el uso de la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky, para determinar la evaluación del nivel de concentración y meditación de personas. Este estudio lo realizaron en 30 estudiantes de ingeniería eléctrica, midiendo a través de un electroencefalograma EEG, las frecuencias de las ondas cerebrales. Los investigadores observaron un incremento de baja actividad en las ondas alfa, durante la transición de tener los ojos abiertos al estado de ojos cerrados. Adicionalmente, un sistema de monitoreo fue implementado para mantener a los conductores despiertos por notificaciones a través de una alarma, utilizando un algoritmo de umbral de porcentaje adaptativo para la activación de alarmas. Como otra aplicación, se desarrollaron unos sensores para sistemas auxiliares de frenado. En el proceso de frenado, el pensamiento del conductor se detecta en un tiempo de 130 milisegundos. Esta disminución del tiempo y la distancia de frenado de un vehículo cerca a los 100 km / h, por casi 3,7 metros.

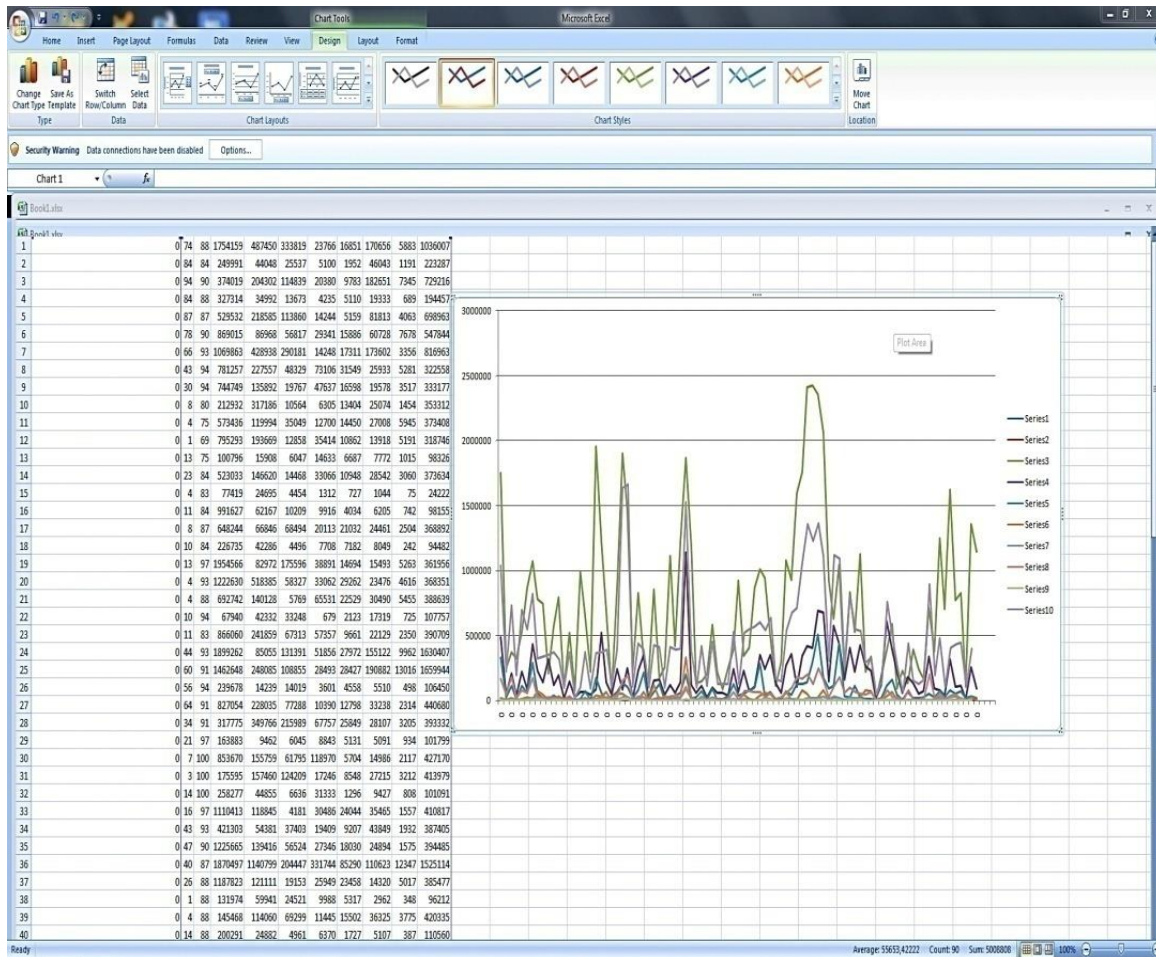
Lancheros *et al.*, (2018), analizaron las dificultades en el aprendizaje, que pueden presentarse en los procesos de la atención y la interpretación del lenguaje escrito o hablado. Para evaluar estas dificultades, los autores utilizaron la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky y otros contenidos computacionales para facilitar el proceso cognitivo en la mejora de este tipo de dificultades. Los autores mostraron los resultados de evaluar las actividades de aprendizaje y niveles de atención en niños, teniendo en cuenta las ondas cerebrales con el fin de implementar un sistema adaptativo computacional para el desarrollo de actividades educativas teniendo en cuenta el nivel de atención.

El sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky mide las ondas cerebrales y clasifica las bandas de frecuencia como se presenta a continuación

Tabla 6 Banda de Frecuencias de Neurosky Think Gear EEG

Delta	(1 - 3 HZ)
Theta	(4-7 HZ)
Low Alpha	(8-9 HZ)
High Alpha	(10-12 HZ)
Low Beta	(13-17 HZ)
High Beta	(18-30 HZ)
Low Gamma	(31-40 HZ)
High Gamma	(41-50 HZ)

Figura 24 Bandas de frecuencias obtenidas a partir de la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky.



Fuente Neurosky.com

Para esta investigación doctoral, las ondas que interesan medir son las Beta y Gamma (30-60 Hz) las cuales aparece en los estados de atención y concentración y que evaluarán el comportamiento de los conductores y la conducta de los mismos durante la ejecución del experimento.

3.2.1 Definición de las condiciones del área de conducción

Las personas que participaron en el experimento son de diferentes regiones del país, de diferente estrato socioeconómico y diferentes grados de escolaridad. Al conductor se le preguntó si desea conducir el vehículo con transmisión mecánica o transmisión automática.

Esta información es necesaria para configurar el software del simulador. Luego se capacita al conductor sobre el uso del simulador de conducción, donde se le explica que va a ir dentro de la cabina de un vehículo y que debe conducir como lo hace normalmente, observando espejos retrovisores, el velocímetro y tacómetro y otras condiciones de la conducción natural, haciendo una prueba preliminar de manejo.

Al conductor se le instala el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky en la cabeza y la información que se obtenga de la misma será registrada vía bluetooth al computador, en el cual con el programa SDK de Neurosky y el desarrollo del programa en Matlab, se va grabando la información en tiempo real del grado de concentración del conductor durante la prueba. Adicionalmente, el programa del simulador va grabando los errores cometidos por el conductor durante la prueba.

Al terminar el escenario, los datos del sujeto son grabados tanto los obtenidos con el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG, como los procesados por el simulador, entre otros la hora de inicio y final de la prueba y el tiempo en segundos de cada uno de los errores cometidos en la conducción.

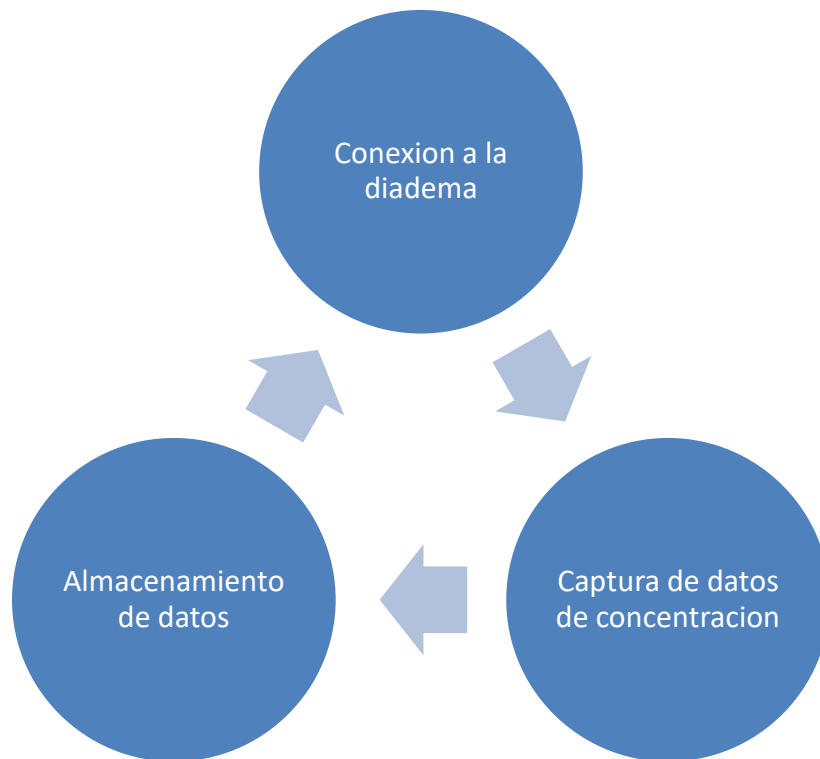
El experimento se realizó de la siguiente manera:

- Se le explica al sujeto el objetivo del estudio y si está de acuerdo, se le entrega el consentimiento informado para que lo lea y lo firme. Se le explica que los datos son confidenciales y sólo se van a usar con fines académicos.
- Para menores de edad, se debe firmar el asentimiento notificado por parte del menor y por uno de sus acudientes mayores de edad.
- Se le pregunta al sujeto su edad y tipo de transmisión en que desea conducir.
- Se le instala el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky en la cabeza y se le explica que este sensor de actividad eléctrica cerebral EEG no afecta su salud y que va a capturar las ondas cerebrales mientras conduce.
- Se le explica como conducir en el simulador, y se le indica que el conductor va dentro del vehículo, por lo cual debe prestar atención a los retrovisores y distancia al conducir.
- Al conductor se le capacita en el simulador, haciendo una prueba piloto antes de la ejecución del experimento, para observar si entendió el funcionamiento del mismo.

-
- Al conductor se le entrega el celular disponible para la prueba y se le retiene su celular personal para que no interfiera en el estudio. Se le explica que es libre de mirar y contestar los mensajes del celular si así lo desea, si no lo desea, no hay ningún inconveniente.
 - Mientras el sujeto va conduciendo se le envía mensajes de *Whatsapp* tanto de texto como de imagen. Este celular tiene un timbre característico y vibra, para que el sujeto escuche y sienta el celular al momento de recibir el mensaje.
 - Los mensajes son enviados de manera aleatoria, con el fin de observar el grado de distracción del sujeto durante la prueba.
 - Una vez termina la prueba, se le pregunta al sujeto si ha sufrido de vértigo o mareo durante el lapso de tiempo en que se realizó la prueba.
 - Toda la información obtenida se graba en el disco duro, en discos externos de soporte y en el drive del correo institucional, como respaldo del experimento en caso de falla o pérdida parcial o total de la información en alguno de los medios de almacenamiento.

La captura de datos de concentración se implementó mediante un algoritmo cíclico que captura los datos de la concentración, calculados por el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG NeuroSky, y que posteriormente fueron almacenados digitalmente para el post-procesamiento de la información. La siguiente gráfica, muestra de forma general el proceso realizado para la captura de la información de la concentración. La Figura 25 resume el proceso de la captura de datos explicado en este párrafo.

Figura 25 captura de datos a partir de la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG NeuroSky.



Para la ejecución de este experimento no hubo un grupo de control de usuarios que no recibieran mensajes de *Whatsapp* durante la conducción, No fue necesario hacer este control debido a que la concentración no es una medida cualitativa si no medida cuantitativa que se midió con un aparato tecnológico como es el sensor de actividad eléctrica cerebral EEG Neurosky. Lo que se buscó con el experimento fue medir los niveles de concentración de personas que estaban recibiendo distractores a través del teléfono celular, y se midió esta concentración en una escala de observación. A continuación, se presentan algunas figuras del simulador y el proceso de captura de datos.

3.3 Obtención del grupo de participantes

A partir de esta información obtenida se hizo el diseño del experimento de esta investigación doctoral, donde se obtuvo una muestra poblacional de 167 participantes, y se establecieron unos protocolos para la ejecución de la prueba, esto con el fin de evitar la obtención de datos dispersos o información sesgada para el posterior análisis de la misma y posterior planteamiento del modelo de comportamiento de conductores que se quiere plantear en esta investigación doctoral.

Se presenta un protocolo de conducción:

Protocolo 1: se simulará una vía en un ambiente urbano, con un tráfico de hora pico, en horas de la tarde, en la conocida “hora azul” (6:00 PM a 7:00 PM), que es ese espacio de tiempo en que el sol se ha ocultado y no es de día ni de noche, el cual crea condiciones de visibilidad adversas ya que no es nítida la vía para el conductor, aún con las luces de las farolas del vehículo encendidas, clima variable, y se creará un escenario de conducción de 10 minutos.

En dicho escenario, se le solicitará al conductor conducir de forma natural, respetando las señales de tránsito, a la velocidad que esté acostumbrado a conducir se le permitirá el uso de un celular suministrado en la prueba. No se permite el uso del celular personal del usuario

Durante dichas pruebas, el participante irá sentado en la silla del simulador, creando las condiciones de la cabina de un vehículo. La visión panorámica es de 135°, creando la sensación que existe cuando se conduce un vehículo real.

Las variables por medir en este experimento se presentan a continuación:

- velocidad,
- grado de concentración,
- tiempo de ocurrencia de la distracción
- tipo de distracción (mensaje, imagen, audio o video),
- contenido del mensaje,

Las condiciones del experimento son:

- geometría de la vía,
- clima,
- hora del día,
- género
- rangos de edad.

Se establece un consentimiento informado (se presenta de manera más detallada en el anexo 1, en cual se le informa al participante del experimento la siguiente información:

- Se va a grabar un registro de sus señales biológicas (ondas eléctricas generadas por el cerebro)
- Dicha información se va a almacenar en un archivo electrónico.
- Posteriormente, se usará esta información para analizar los patrones de comportamiento durante la conducción en el simulador.
- Esta información es confidencial, con fines académicos y no afecta su salud física y mental.

A continuación, se explica paso a paso la realización del experimento.

1. El experimento se realiza en un ambiente controlado, en el cual se usa un simulador y programa de simulador de entrenamiento para conducir desarrollado por la firma Foerst GmbH.
2. El simulador se ubica en una posición constante, se graba con cámara de video y se toman fotos del proceso de simulación de conducción. El conductor en ningún momento no puede usar su dispositivo celular. Para el estudio se le entrega un celular que es, con el cual se evalúa el grado de concentración al conducir. El escenario de conducción es el mismo para todas las personas que participan en el experimento, las condiciones climáticas son las mismas para todos los participantes, el escenario se desarrolla en zona urbana.
3. El simulador de conducción presenta las siguientes características:

Simulador de conducción marca GPG referencia GPG001, que consta de un computador de escritorio conformado por un procesador Intel I7, 16 GB de memoria RAM, disco duro de 1 TB, disco de estado sólido de 240 GB, tarjeta de video GTX de 8 GB, timón de conducción marca Thrustmaster T500 con adaptador de vehículo

de calle, chasis en tubería estructural con silla corredera de auto de carreras, pedales y caja de ajuste gradual para soporte de pantallas de televisor, sistema de audio Logitech Z506, televisores Led Samsung de 32" con una configuración de 135 grados de visión panorámica y la sensor de actividad eléctrica cerebral EEG de medición de ondas cerebrales marca Neurosky, modelo mindwave mobile 2. Este simulador fue construido por el autor del proyecto para la realización de esta investigación doctoral.

3.3.1 Criterios de exclusión

La muestra poblacional que participó en esta investigación doctoral cumplió ciertos criterios básicos, los cuales se presentan a continuación:

- Tener una licencia válida de conducción
- Haber conducido al menos por más de 1 año
- Haber conducido al menos durante 1 semana en el último año de la prueba
- No presentar desordenes físicos ni cognitivos
- No tener enfermedades del sistema nervioso central
- No estar embarazada
- No haber consumido bebidas alcohólicas ni sustancias alucinógenas antes de la prueba.

La enfermedad del simulador es un fenómeno que se ve afectado por las especificaciones del simulador y características de los participantes. Produce síntomas similares, pero típicamente lo que presentan los participantes que conducen en el simulador de conducción es mareo, náuseas, incomodidad ocular y desorientación (Kennedy *et al.*, 1993)

Condiciones del área de conducción

El escenario para ejecutar la prueba de conducción fue el mismo para los 167 participantes del experimento. Se condujo en una zona urbana, con tráfico de hora pico, entre las 6:00 PM y las 7:00 PM, en un ambiente dentro y fuera de zonas urbanas, con peatones y

vehículos circulando en el escenario. La zona urbana presenta andenes, zonas comerciales, zonas de parqueo a la orilla de la vía, gasolineras, señales de tránsito y glorietas a lo largo del desarrollo de la ruta.

Escenario de tráfico

El efecto del flujo de tráfico y su efecto distractor mientras se conduce, es importante en esta investigación. La simulación del ambiente (por ejemplo, el comportamiento de otros vehículos en la simulación de la red vial del experimento) puede ser muy compleja en algunos casos. Es importante observar la simulación del comportamiento de no más de 1 o 2 vehículos en relación con el vehículo simulado en este experimento. La simulación del ambiente del tráfico es mucho más demandante que el modelo clásico de microsimulación de tráfico, por tal razón, el software tiene implementado un marco de movimiento similar que cuando se conduce de manera natural, de esta manera, el ambiente no es estático.

Escenario de distracción

El factor distractor durante la prueba va a ser el envío de mensajes por medio de la aplicación de mensajería instantánea *Whatsapp*, lo cual se hace por medio de un celular suministrado durante la prueba de conducción a cada uno de los participantes; adicionalmente, se prohíbe el uso del teléfono celular personal para evitar distracciones adicionales

Características de los conductores.

En las Tablas 6, 7 y 8 se presenta la distribución de los participantes del experimento, por edad, género, estrato socioeconómico y grado de escolaridad. 39 participantes fueron mujeres y 128 fueron hombres, para un total de 167 personas, siendo la cantidad de participantes mayor a la muestra poblacional que se explica en el capítulo 5, donde el tamaño es representado por 23 mujeres y 107 hombres, para un total de 130 participantes.

Distribución de los participantes por grupo y por edad

La Tabla 7 muestra la distribución de los participantes por rango y edad, concentrándose la mayor población femenina en el rango de 31 a 40 años y la masculina de 21 a 30 años, seguida por el rango de 31 hasta los 60 años.

Tabla 7 Distribución de participantes por grupo y rango de edad

Rango de edad	Femenino	Masculino	Gran Total
0 a 20	2	15	17
21 a 30	8	28	36
31 a 40	15	23	38
41 a 50	7	23	30
51 a 60	3	23	26
61 a 70	2	7	9
71 a 80	1	6	7
81 a 90	1	3	4
Gran Total	39	128	167

Figura 26 Distribución de participantes por grupo y rango de edad

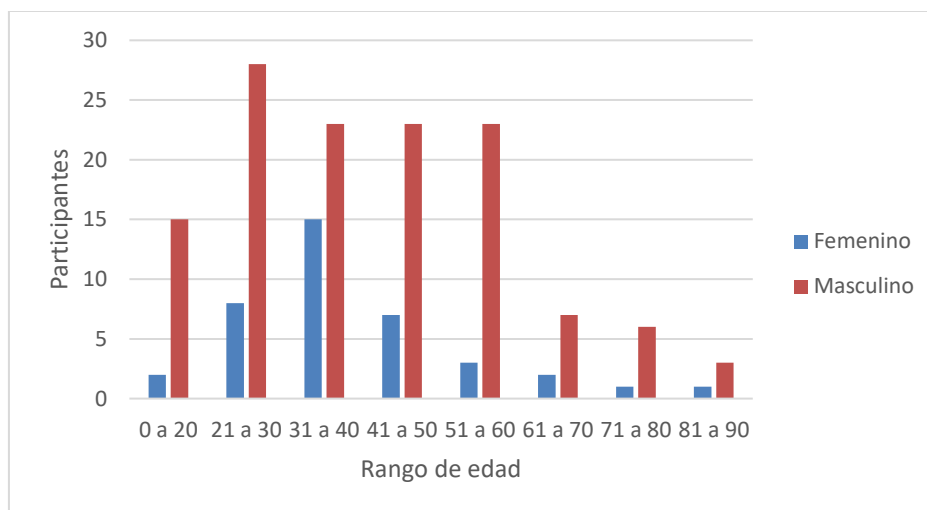


Tabla 8 Distribución de participantes por estrato socioeconómico

Estrato socioeconómico	Femenino	Masculino	Gran Total
1		5	5
2	7	30	37
3	28	71	99
4	3	17	20
5		5	5
6	1		1
Gran Total	39	128	167

Figura 27 Distribución de participantes por estrato socioeconómico

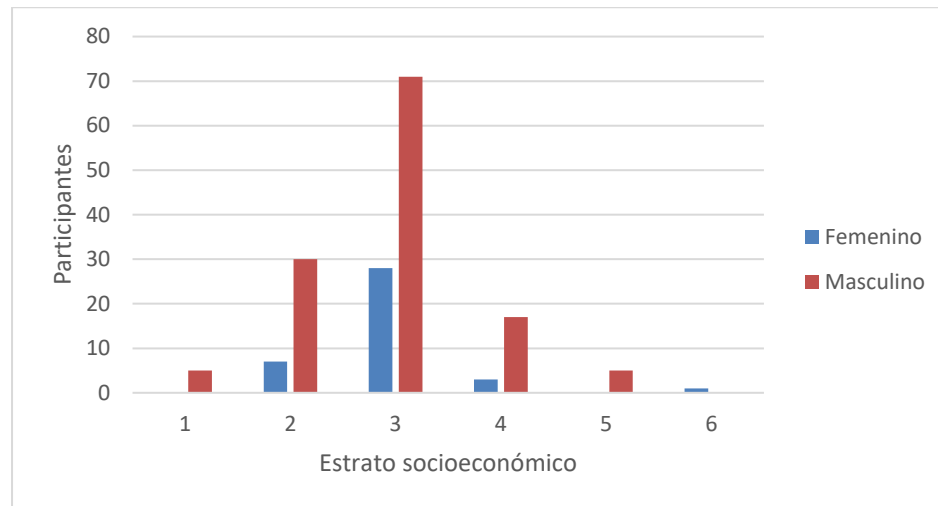
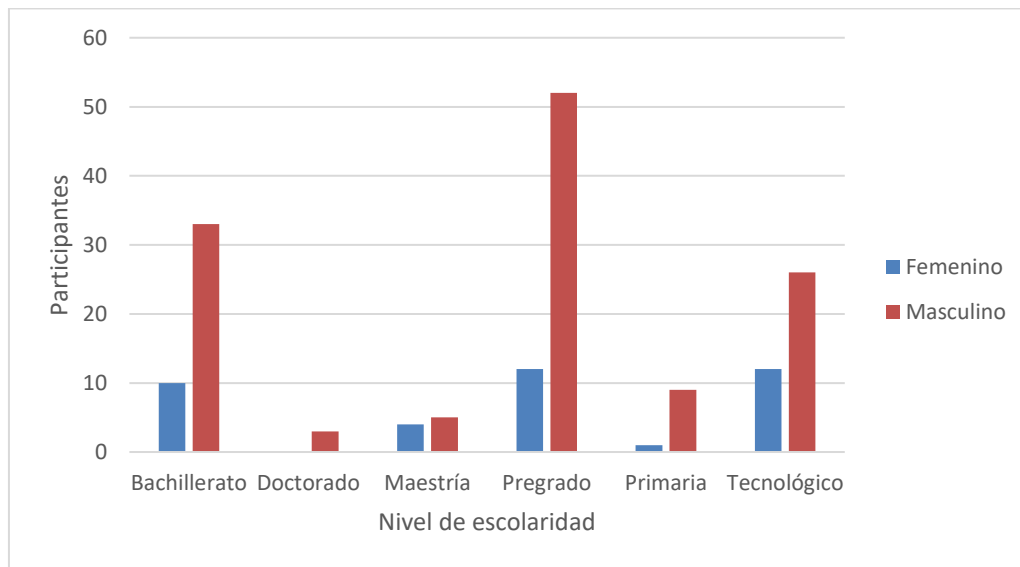


Tabla 9 Distribución de participantes por nivel de escolaridad

Nivel educativo	Femenino	Masculino	Gran Total
Bachillerato	10	33	43
Doctorado		3	3
Maestría	4	5	9
Pregrado	12	52	64
Primaria	1	9	10
Tecnológico	12	26	38
Gran Total	39	128	167

Figura 28 Distribución de participantes por nivel de escolaridad



3.4 Especificación de las entradas y salidas del modelo a construir

Las variables de entrada que van a ser usadas para la construcción de los diferentes modelos se presentan a continuación:

- Información demográfica del conductor
 - Genero
 - Estrato socioeconómico
 - Nivel educativo
 - Edad
- Información del conductor recolectada en el simulador de
 - Registro de accidentes con estampas de tiempo (conducción indebida, infracciones y accidentes)
 - Funcionamiento sistemas
 - Registros (cámaras, sensores, cajas negras, etc.)
- Información del conductor recolectada en el sensor de actividad cerebral EEG
 - Concentración (Canal Alpha)

La salida del modelo es:

Funciones de respuesta

(Problema Inverso)

Y el resultado del modelo es determinar la probabilidad conductor genere incidentes y accidentes.

Capítulo 3. Resultados y construcción de los modelos.

El capítulo 3 presenta los resultados obtenidos en esta investigación doctoral, el análisis de los datos y explica la construcción de los modelos utilizando las diferentes técnicas de modelado como son la regresión logística, Machine Learning y redes neuronales técnicas con las cuales se hicieron los análisis de los datos obtenidos en el experimento. Se expone la metodología utilizada y los modelos que mejor se ajustan a la predicción en la generación de accidentes de tránsito que se plantean como aporte a la generación de nuevo conocimiento

3.1 Análisis exploratorio de los resultados experimentales

La información de accidentes que cometieron cada uno de los 167 participantes del experimento se analizaron para evaluar la tendencia en las variables demográficas y combinatoria de estas variables como se presenta a continuación

Figura 29 Porcentaje de concentración por género

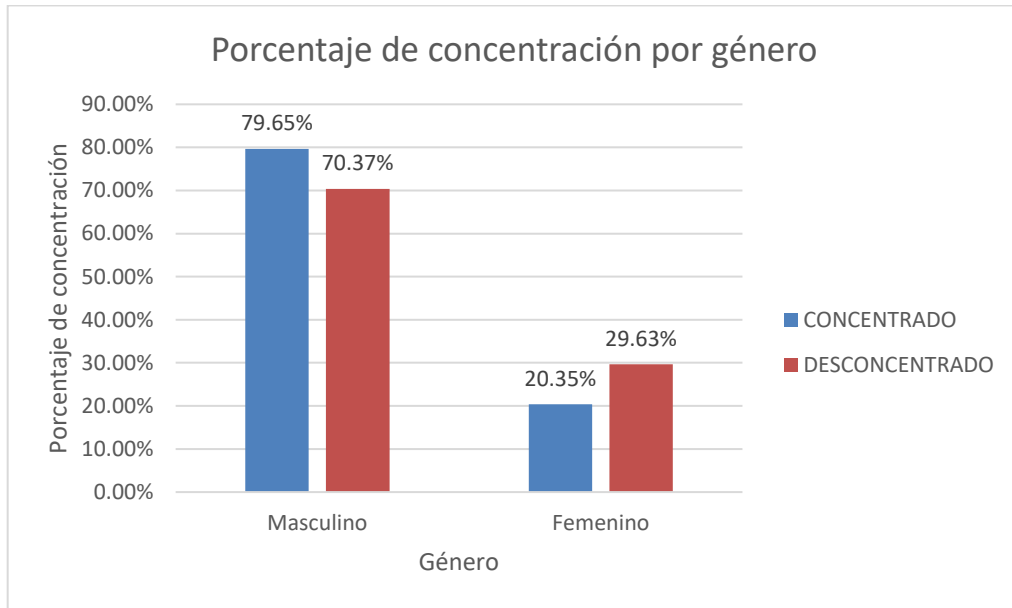


Figura 30 Participantes por género

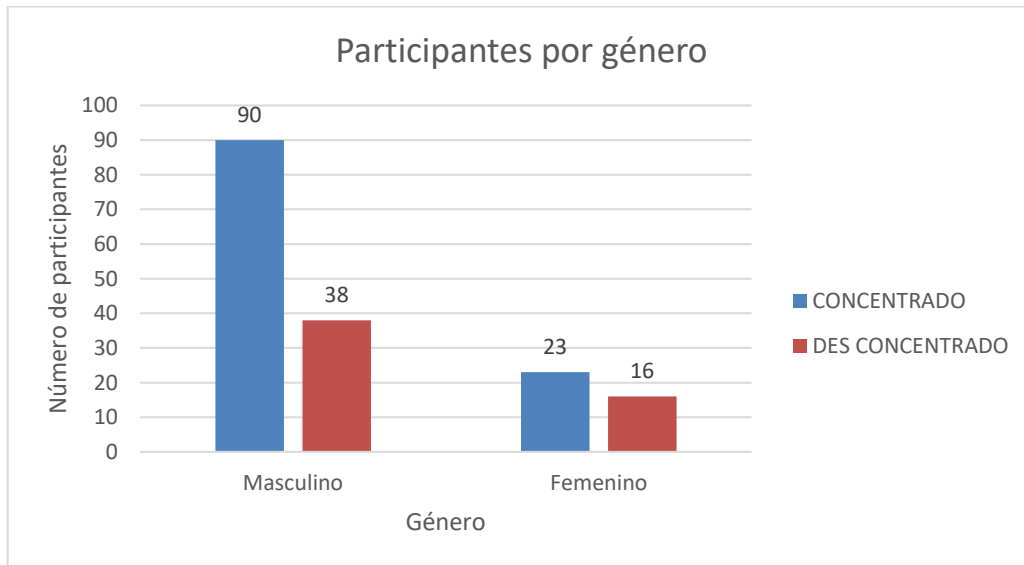


Figura 31 Concentración en porcentaje por estrato

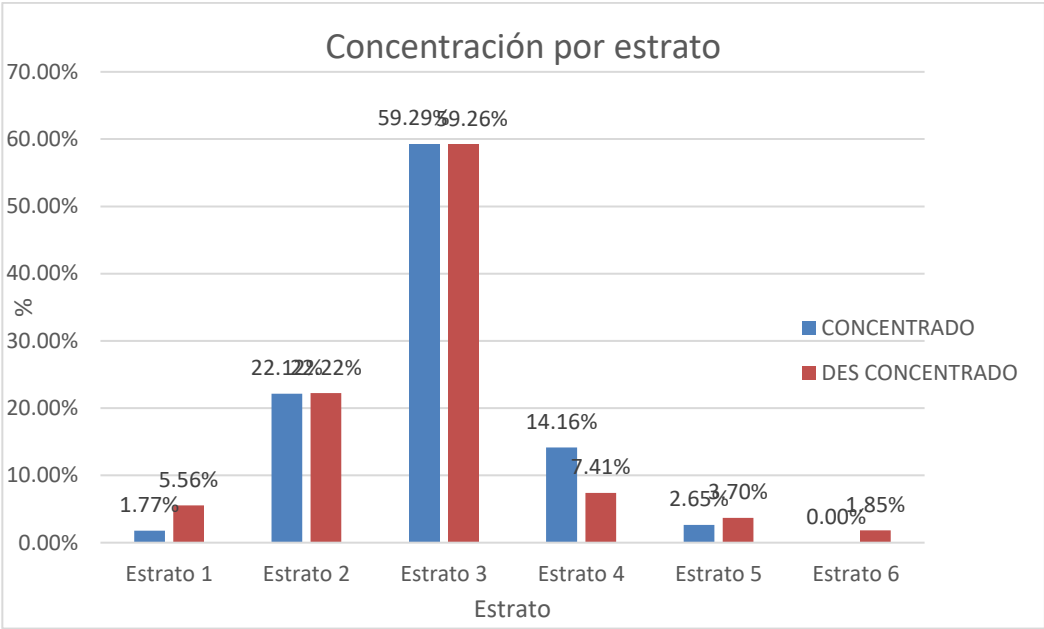


Figura 32 Concentración por estrato

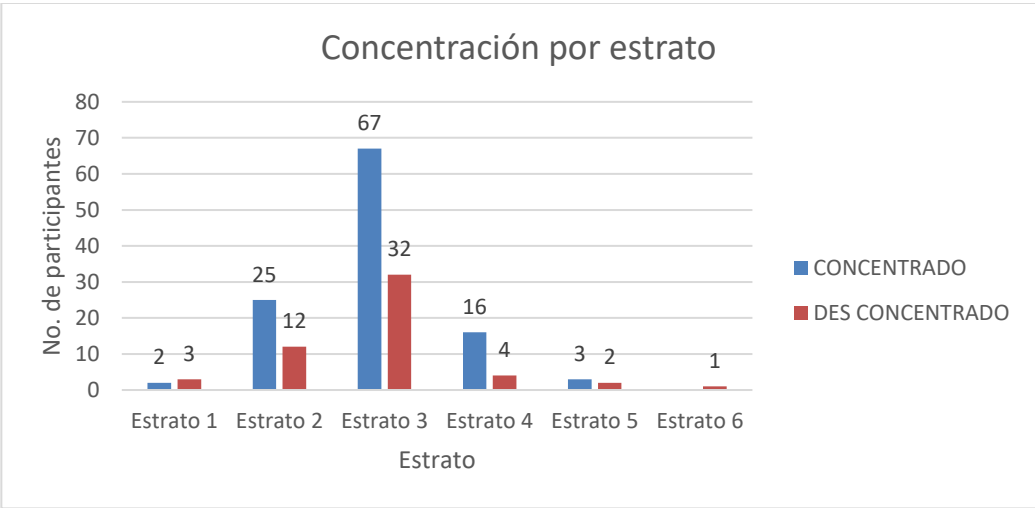


Figura 33 Concentración por nivel educativo

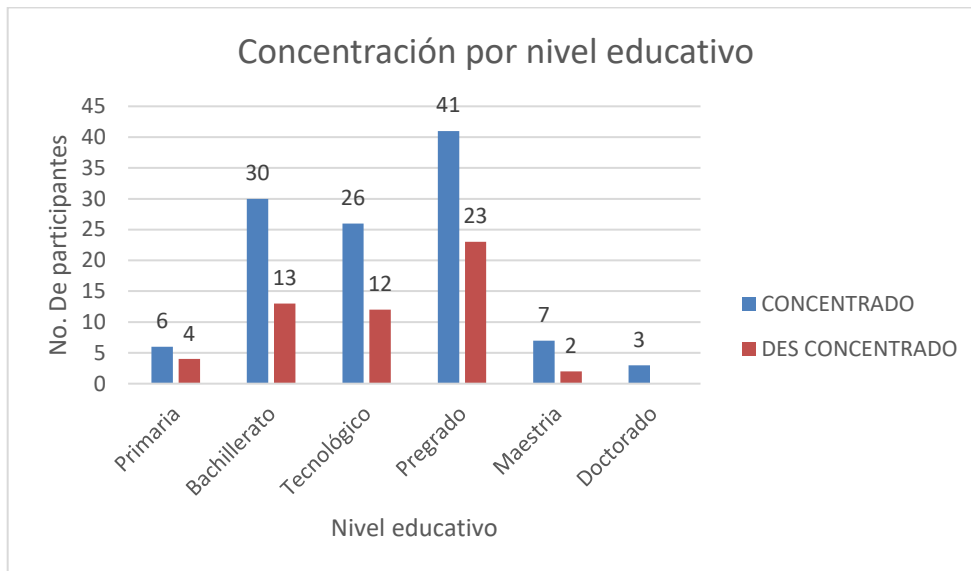


Figura 34 Concentración por porcentaje por nivel educativo

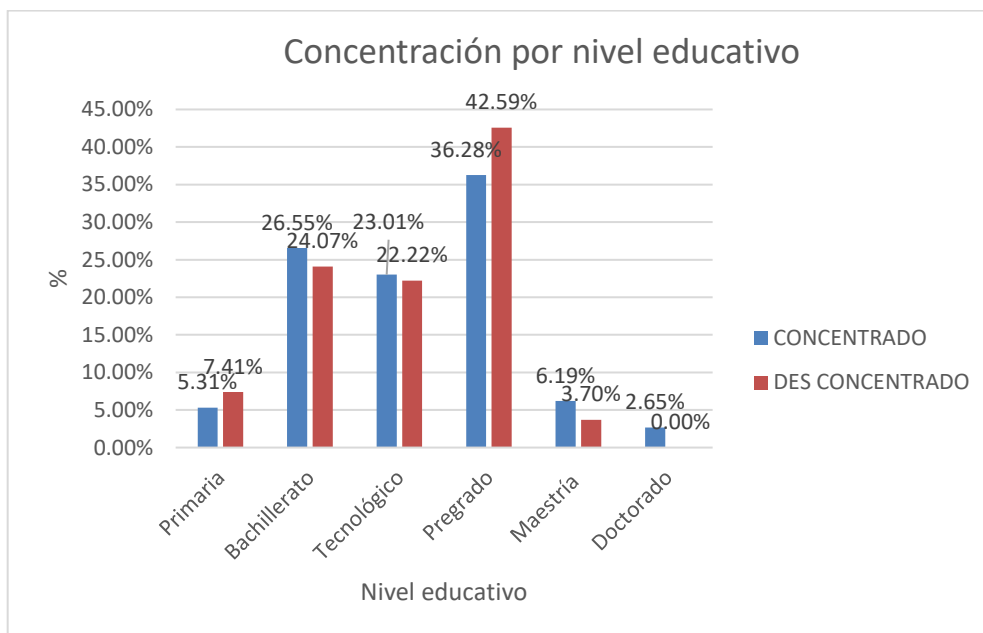


Figura 35 Concentración por porcentaje por rango de edad

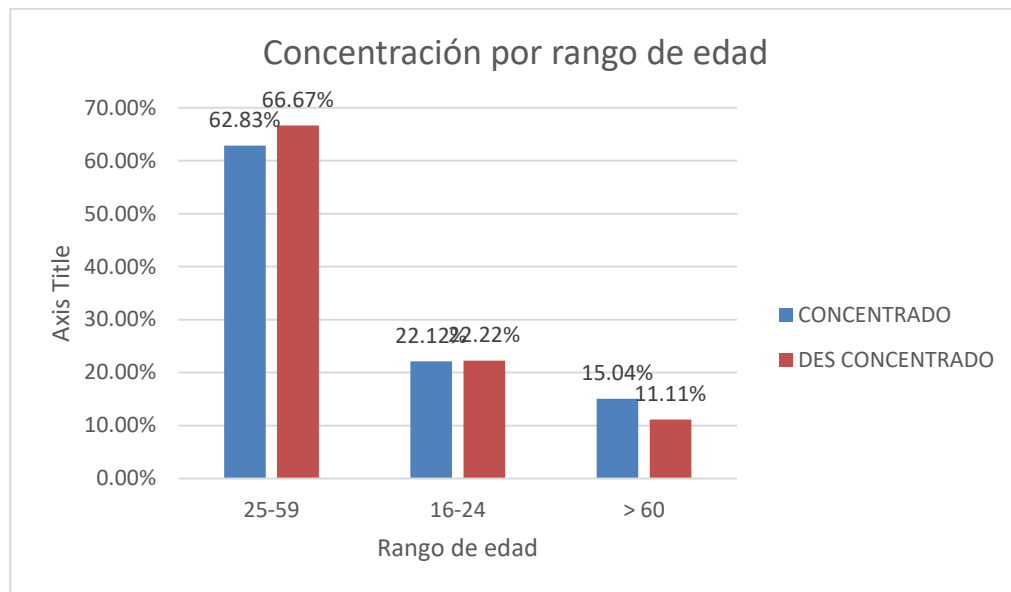


Figura 36 concentración por rango de edad

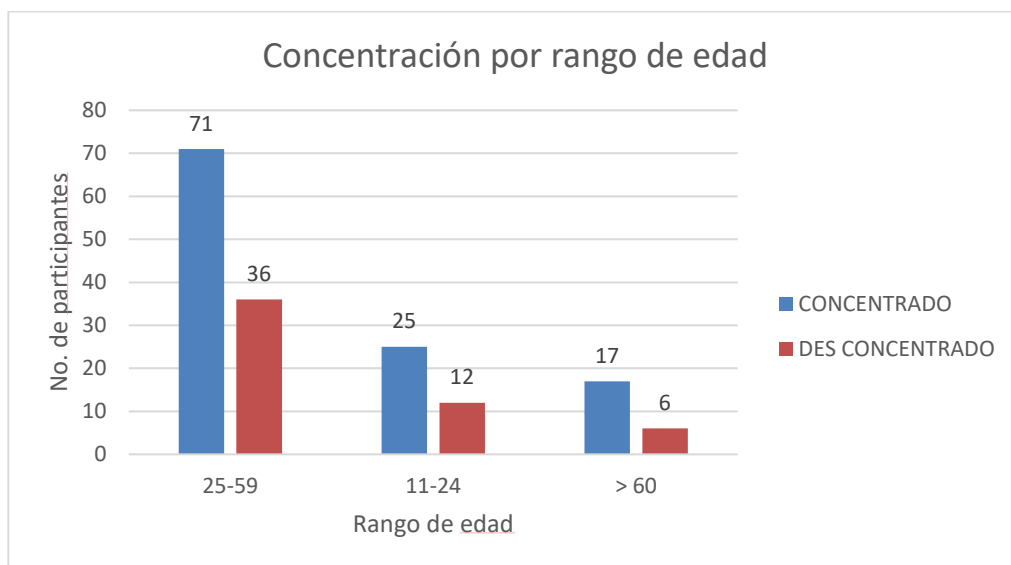


Figura 37 Concentración por género por rango de edad

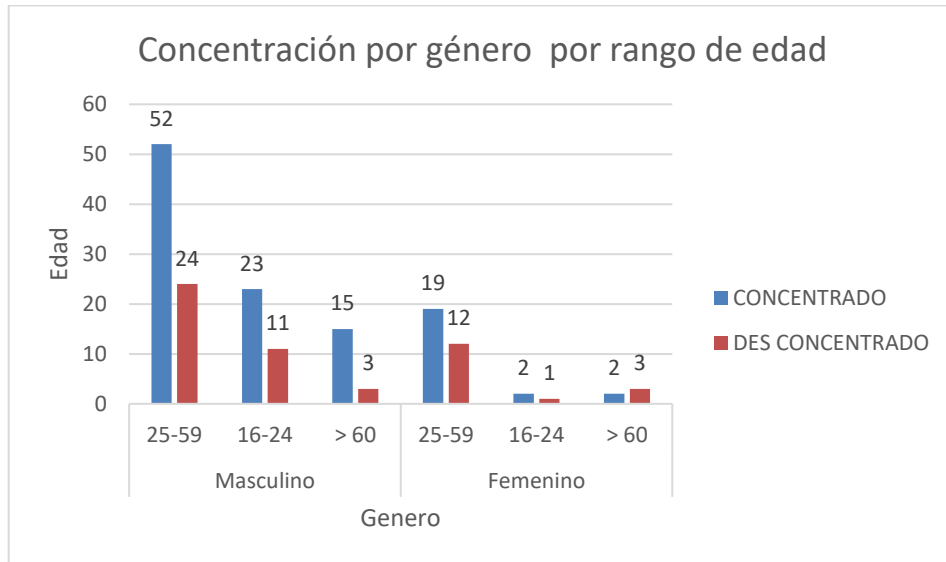


Figura 38 Errores más comunes por edad, por género

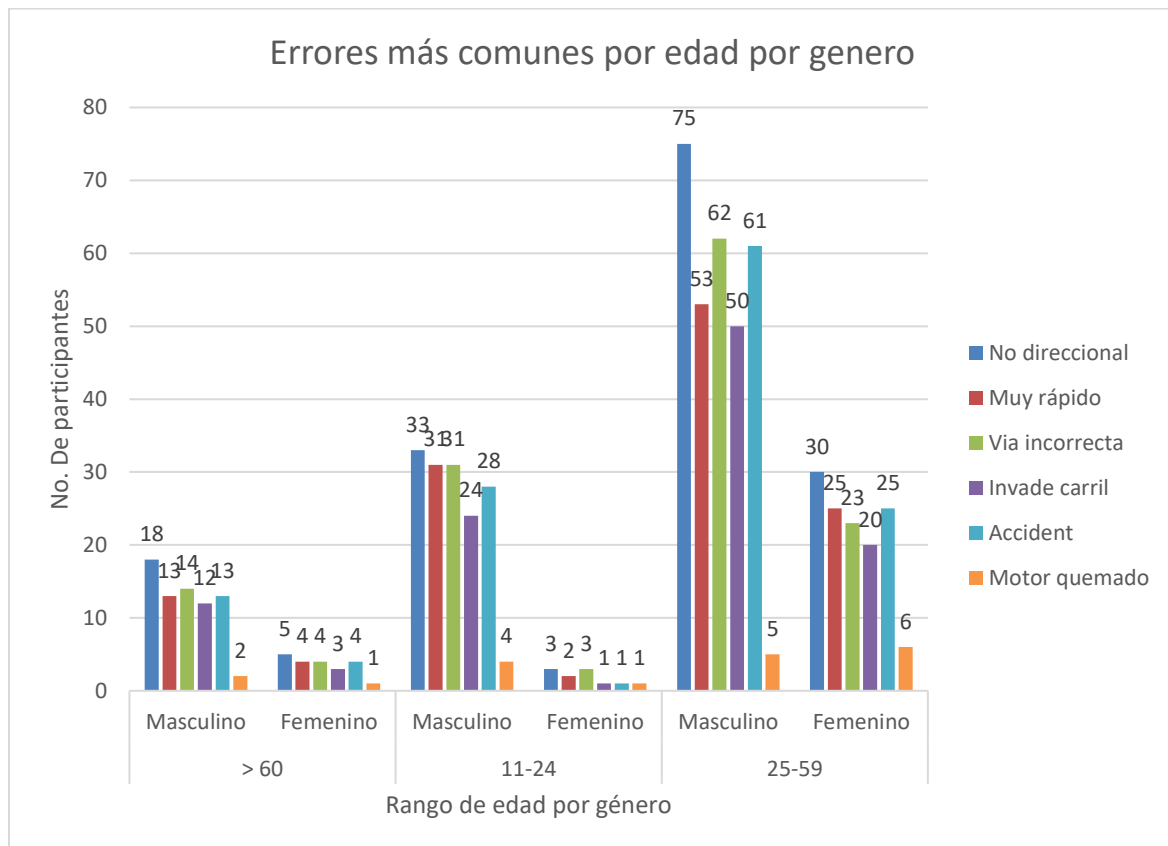
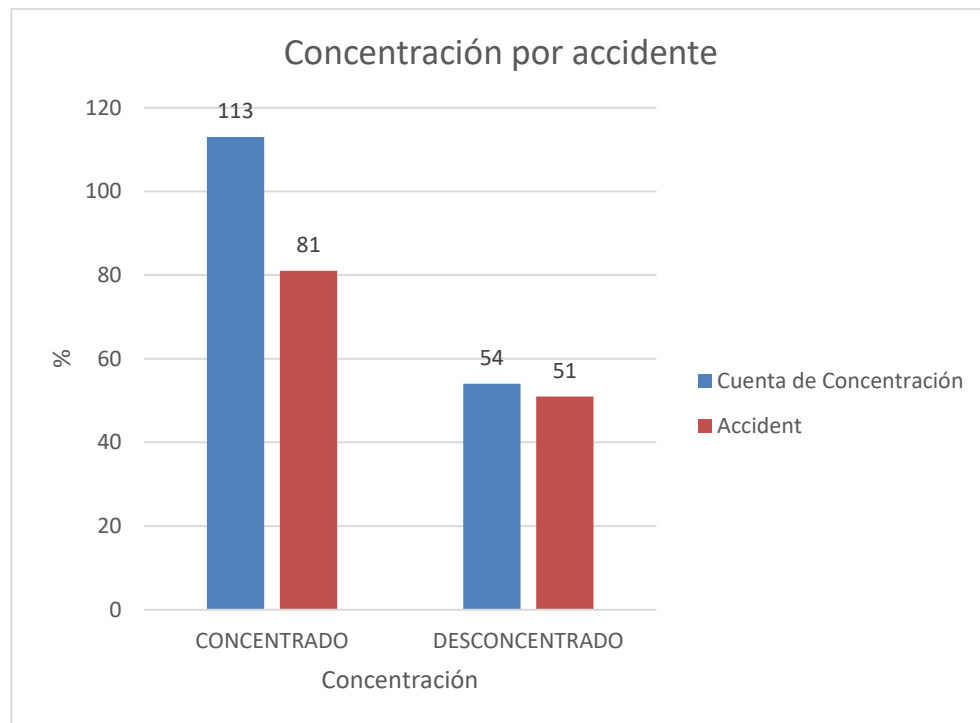


Figura 39 Concentración por accidente



3.2 Modelos contruidos con regresión logística

Una vez se ha determinado el modelo de clasificación de concentración, se debe plantear el modelo de comportamiento de conductores, que permita determinar la probabilidad que ocurra o no un accidente a partir de los datos de concentración obtenidos en el simulador.

3.3 Alternativas exploradas para construir los modelos

Para este fin, se procedió a analizar los datos por medio de la regresión logística múltiple. Este tipo de regresión es un método estadístico multivariable, que permite estimar la relación que existe entre una variable dependiente no métrica y un conjunto de variables independientes ya sean no métricas o métricas.

Un análisis de regresión logística presenta el mismo comportamiento de una regresión lineal múltiple y la diferencia entre estos dos tipos de regresión es en esencia, la métrica de la variable dependiente. Aunque las dos técnicas son similares, los enfoques matemáticos tienen caminos distintos.

En una regresión logística, la variable dependiente no es continua, es discreta (tomando valores de 0 y 1) y las demás variables pueden ser cualitativas o cuantitativas y dichas variables son explicativas para el análisis correspondiente. La ecuación obtenida de este modelo no es de tipo lineal, si no es de tipo exponencial.

Este tipo de modelo es útil para esta investigación, ya que la respuesta puede tomar solamente dos valores: 0, ausencia (con probabilidad $1-p$) y 1, presencia (con probabilidad p). Este tipo de modelo es muy útil debido a que el perfil de las variables utilizadas se encuentra conformadas por valores cuantitativos o cualitativos, de tal manera que la finalidad es que todas las variables sean partícipes de una única ecuación conjunta que explique el modelo. (de la Fuente, 2011).

La regresión logística, permite hacer el modelamiento y ver la influencia de las variables regresoras, con la probabilidad de ocurrencia de una situación en particular, en el caso de esta investigación, si ocurre un accidente o no. Dicho en otras palabras, permite determinar el mejor modelo que se ajuste y que describa la relación entre la variable de respuesta (concentración) y un conjunto de variables regresoras.

La regresión logística, se usa como herramienta en esta investigación para predecir la probabilidad que ocurra un accidente o no ocurra, identificando cuales son las variables

predictoras más útiles para determinar esta predicción, como lo son la edad, el género, el nivel educativo y el estrato socioeconómico.

Sin embargo, se debe considerar un aspecto adicional para el modelo de regresión logística y es la eliminación de variables que permitan un mejor ajuste al modelo, con los datos disponibles obtenidos en el simulador de conducción. Se debe hacer un análisis de la incorporación de variables, se debe observar cómo afecta el modelo de regresión al eliminar cada una de las variables. Los coeficientes que se encuentran asociados a cada una de las variables del modelo varían de manera significativa o no, con relación al modelo de regresión si se incluye esta variable. Esto permite determinar si la variable eliminada se comporta como un factor de confusión del modelo planteado, ya que no se relaciona de manera significativa con las demás variables del modelo.

La variable respuesta asociada a unos determinados valores x_{ij} de las variables explicativas sólo tiene por tanto dos posibles valores, que se codifican de la siguiente manera:

- $Y = 1$ si se ha producido el suceso estudiado (el sujeto tuvo un accidente de tránsito de acuerdo con su grado de concentración)
- $Y = 0$ si no se produce el suceso (el sujeto no tiene accidentes de acuerdo con su grado de concentración)

La distribución de variable aleatoria (Distribución de Bernoulli) viene caracterizada por un único parámetro p , que es la probabilidad de que se produzca el suceso en cuestión. Se demuestra fácilmente que la media $E(Y)$ de Y es precisamente p .

El modelo general de regresión logística se encuentra presentado a continuación:

$$E(Y/X_1=x_{1j}, \dots, X_I=x_{Ij}) = p/(X_1=x_{1j}, \dots, X_I=x_{Ij}) = f(x_{1j} \dots x_{Ij})$$

3.3.1 El concepto del ODD o el riesgo.

En un modelo de regresión logística, se presenta el problema en el que la función $f(x_1j, \dots, x_lj)$ debe estar siempre entre 0 y 1, por tratarse de una probabilidad. Para evitar esta situación, se utiliza el concepto del Odd ratio o una traducción no literal que puede significar el riesgo. El Odd ratio (OR) que se asocia a un suceso de probabilidad P determinado, se define como el cociente $P/(1-P)$

$$Odd = \frac{P}{1-P} \quad (11)$$

Para entender este concepto, a un suceso de probabilidad $P = 0.8$, su Odd es igual a:

$$Odd = \frac{0.8}{1-0.8} = 4$$

Esto significa que es 4 veces más probable que ocurra el evento a que no ocurra.

Los Odd pueden variar entre 0 (cuando $P=0$) e infinito (cuando $P=1$) y, por lo tanto, su logaritmo (se trabaja habitualmente con logaritmos neperianos) puede tomar cualquier valor entre $-\infty$ (que es el logaritmo de 0) y $+\infty$ (que es el logaritmo de $+\infty$).

3.3.2 La prueba exacta de Fisher.

La prueba exacta de Fisher es un método utilizado en estadística cuando se desea analizar si existe una asociación entre dos variables de tipo cualitativo, en otras palabras, lo que se busca es analizar si las proporciones que existen en una variable son distintas dependiendo del valor que adquiere la otra variable. Este tipo de prueba se utiliza para comparar dos variables categóricas con dos niveles para cada una de las variables

La prueba exacta de Fisher es más precisa que las pruebas de X^2 (chi cuadrado) de independencia o la prueba G de independencia. Este tipo de prueba se utiliza cuando el

número de datos o eventos del experimento esperado para cada nivel es pequeño. Las condiciones de esta prueba exigen que los valores esperados de al menos un 80% de la tabla de contingencia sean mayores a 5. Al final, la prueba exacta de Fisher se basa en la evaluación de la probabilidad asociada y busca analizar las probabilidades bajo la hipótesis nula de independencia de las dos variables que se están considerando para el análisis de los resultados. (Luna del Castillo, 1987).

En este tipo de prueba, el p-value o X^2 , define si el modelo es significativo o no lo es. Por tal razón, este modelo pretende explicar la accidentalidad de sujetos, de acuerdo con su grupo étnico, género, nivel de estudios y estrato socioeconómico. Para tal fin, se hizo un análisis exploratorio de la muestra una regresión logística para determinar los factores que explican la accidentalidad, a partir de la técnica de stepwise forward, un OR para determinar el número de veces que es más probable que ocurra el accidente, el estadístico de Hosmer para determinar si las modalidades de los factores multinomiales se ajustan se ajustan para explicar la accidentalidad, el área bajo la curva para determinar si el número de individuos bajo la curva para determinar la proporción de individuos bajo la curva que explican el modelo de accidentalidad y la exactitud y precisión del modelo planteado.

En la Tabla 26 se presenta un resumen del número de accidentados y porcentajes dependiendo su género, edad, estrato socioeconómico y nivel educativo. Adicionalmente se muestran los resultados de la prueba exacta de Fisher, donde se observa si existe o no, una relación significativa entre cada una de las variables analizadas y la accidentalidad. El factor OR que como se explicó antes, muestra la probabilidad de ocurrencia del accidente.

3.3.3 La prueba de Hosmer.

La prueba de Hosmer es una prueba bondad de ajuste de datos a un modelo de regresión logística. Este tipo de pruebas se utiliza en medicina, ya que es una prueba de bondad donde se evalúa la distancia entre los datos obtenidos y lo esperado bajo el modelo

Esta prueba consiste en dividir el recorrido de los valores obtenidos de una variable dependiente en una serie de intervalos. Cada uno de estos intervalos deben contener un

número de observaciones suficientemente grandes (mayores a 5), en el cual lo que se busca es contar cada uno de los intervalos: el esperado y el observado para cada uno de los dos posibles resultados de la variable dependiente. El valor esperado es el teórico calculado a partir del modelo construido y el observado es el valor que se tiene. El estadístico utilizado es el χ^2 .

3.4 Universo inicial a analizar

De acuerdo con la información obtenida por la plataforma Runt del Ministerio de Transporte de Colombia, el número de licencias de conducir activas al 31 de diciembre de 2018 fueron 14.720.865 desde la implementación del Runt en el año 2009. De este total de licencias, 10.807.411 licencias pertenecen al género masculino, equivalente al 73.5% de las licencias expedidas y 3.903.454 pertenecen al género femenino, equivalente al 26.5% de las licencias de expedidas en el país. Con estos valores, se procedió a determinar una muestra que tuviese un tamaño similar al total de licencias expedidas.

3.5 Tamaño de la muestra poblacional

Debido a las características del universo, se debe determinar el tamaño de la muestra poblacional, seleccionando entre muestreo aleatorio o un muestreo no aleatorio. En métodos aleatorios, la selección de los elementos de la muestra es al azar e independiente de la opinión de cualquier persona (investigador o entrevistador). En los métodos no aleatorios, esta condición no siempre se cumple.

En ambos casos, pueden seleccionarse elementos de la población a analizar o grupos de elementos de la población. La Figura 40 resume la clasificación de los métodos de muestreo: La Tabla 10 resume las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de muestreo.

Figura 40 Tipos de muestreo.

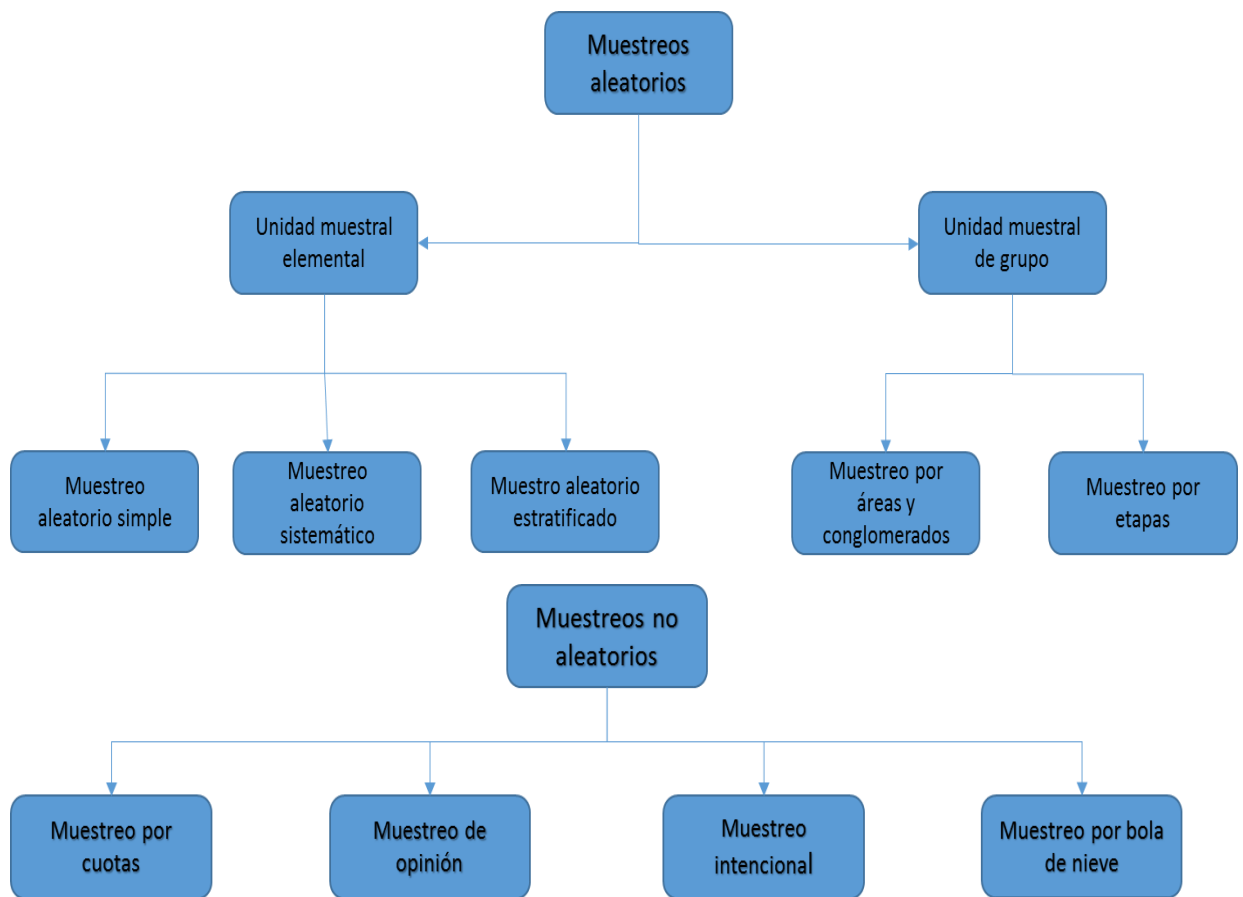


Tabla 10 Ventajas y desventajas de los tipos de muestreo aleatorio.

TIPO DE MUESTREO	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aleatorio simple	Se selecciona una muestra de tamaño n de una población de N unidades, cada elemento tienen una probabilidad de inclusión igual conocida como n/N	Sencillo y de fácil comprensión	Requiere que se posea de antemano un listado completo de toda la población.
Sistemático	Se necesita un listado de los N elementos de la población. Tras determinar el tamaño muestral n , se define un valor $p=N/n$. Se elige un número aleatorio K entre 1 y p ($k=$ arranque aleatorio) y se seleccionan los elementos de la lista que ocupan lugares $k, k+p, k+2p, \dots$	Fácil de aplicar: Cuando la población está ordenada siguiendo la tendencia conocida, asegura una cobertura de unidades de todos los tipos.	Si la constante de muestreo está asociada con el fenómeno de interés, las estimaciones obtenidas a partir de la muestra pueden contener algo de selección.
Estratificado	En ciertas ocasiones resultará conveniente estratificar la muestra según ciertas variables de interés. Para ello se debe conocer la composición estratificada de la población	Tiende a asegurar que la muestra represente adecuadamente a la población en función de las variables seleccionadas. Estimaciones más precisas. Su objetivo es conseguir una muestra lo más semejante posible a la población en lo referente a las variables estratificadoras.	Se ha de conocer la distribución en la población de las variables utilizadas para la estratificación.
Conglomerado-Etapas	Se seleccionan aleatoriamente cierto número de conglomerados y se investigan todos los elementos de cada uno de ellos. El muestreo por etapas es una generalización que va de más grandes a más pequeños. Se realizan varias fases de muestreo sucesivas	Es muy eficiente cuando la población es grande y dispersa. No es preciso tener un listado de toda la población, solo de las últimas unidades del muestreo. Son más económicas	El error estándar es mayor que en el muestreo aleatorio simple o estratificado. El cálculo del error estándar es complejo.

Adaptado de Papantoniou (2015)

La muestra poblacional obtenida presenta una tendencia similar al universo analizado, que en este caso es el total de licencias de conducción expedidas y vigentes al 31 de diciembre de 2018. Las figuras 44, 45, 46, 47, 48 y 49 muestran el comportamiento de

la muestra utilizada en este experimento por edad, género, estrato socioeconómico y nivel educativo.

Figura 41 Distribución de porcentaje de la muestra por género

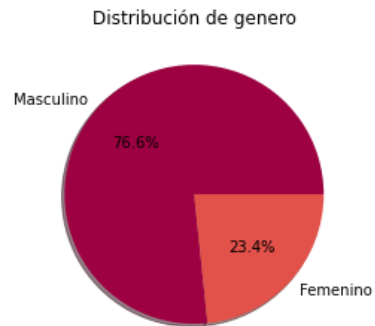


Figura 42 Distribución de porcentaje por estratos socioeconómicos

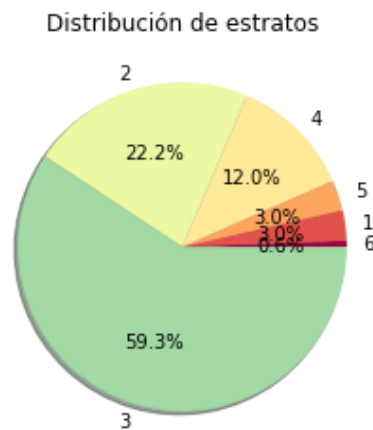
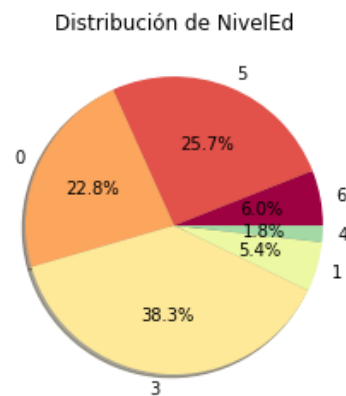


Figura 43 Distribución de porcentaje por nivel de escolaridad



3.6 Construcción de Modelos

Para la construcción de los modelos, se analizaron las variables demográficas del experimento más la variable concentración la cual fue obtenida a través con el sensor de actividad eléctrica cerebral Neurosky. Los diferentes modelos se obtuvieron usando Machine Learning

3.6.1 Modelos econométricos de elección

Este modelo se usó como modelo base, y se analizó el efecto de la concentración y de todas aquellas variables que estuvieron presentes pero que no se modelan

Los modelos Logit o de regresión logística, son los modelos de elección discreta más simple y más utilizados. La fórmula de la regresión logística fue obtenida por Luce (1959) a partir de las presunciones sobre las características de las probabilidades de elección, donde, la más importante de estas características es la independencia de alternativas irrelevantes.. Marschak (1960) demostró que este tipo de axiomas implican que un modelo es consistente con un comportamiento del decisor orientado a la maximización de la utilidad.

La relación de la fórmula de regresión logística con la distribución de la utilidad no observada (que es la opuesta a las características de las probabilidades de elección) fue desarrollada por Marley. McFadden (1974) completó el análisis de la fórmula de regresión logística, demostrando la relación inversa, en otras palabras, que la fórmula de la regresión logística para las probabilidades de elección obligatoriamente implica que la utilidad no observada se distribuye de acuerdo a una distribución de valor extremo.

Para verificar la precisión del modelo planteado en esta investigación doctoral, se realizó un modelamiento econométrico utilizando el paquete de software BIOGEME, que es un paquete de aplicación bajo la plataforma python, que permite estimar con máxima probabilidad una amplia gama de modelos de utilidad aleatorios. Puede estimar particularmente modelos de valor extremo multivariante, incluidos el modelo logit, o regresión logística, el modelo logit anidado, el modelo logit anidado cruzado y el modelo MEV de red, así como mezclas continuas y discretas de estos modelos. Biogeme ha sido diseñado para proporcionar a los modeladores herramientas para investigar una amplia

variedad de modelos de elección discreta sin preocuparse por el algoritmo de estimación en sí.

A continuación, se presenta el modelo econométrico ejecutado en Biogeme y los resultados obtenidos.

Figura 44 Análisis de modelo econométrico de concentración.

BIOGEME Version 1.8 [Sat Mar 7 14:36:56 CEST 2009]
Michel Bierlaire, EPFL

Modelo para encuestas de preferencia

```

                                Model: Multinomial Logit
Number of estimated parameters: 2
  Number of observations: 167
  Number of individuals: 167
    Null log-likelihood: -115.756
    Cte log-likelihood: -75.511
    Init log-likelihood: -115.756
    Final log-likelihood: -72.590
  Likelihood ratio test: 86.331
    Rho-square: 0.373
  Adjusted rho-square: 0.356
  Final gradient norm: +1.354e-004
    Diagnostic: Convergence reached...
    Iterations: 4
    Run time: 00:00
  Variance-covariance: from analytical hessian
  Sample file: MED WAR.dat

Utility parameters
*****
Name Value Std err   t-test p-val Rob. std err Rob. t-test Rob. p-val
-----
ASC1 1.18  0.256    4.61  0.00  0.256    4.61    0.00
ASC2 0.00  --fixed--
Bc   1.05  0.452    2.32  0.02  0.452    2.32    0.02

```

La ecuación del modelo obtenido por esta técnica es:

$$Y = 1.18 - 1.05 C$$

Donde:

Y= Probabilidad de accidente

C= Concentración

Un cambio unitario en la concentración o desconcentración, en la generación de un accidente, tiene un impacto aproximadamente igual (1.05 cerca de 1.18) a la influencia neta de todas las características no observables o no incluida en forma explícita del individuo (en el modelo) o de las otras causas que generaron el accidente y que no se incluyeron en el modelo pero que se pudieron evidenciar en el simulador.

3.6.2. Modelos de regresión logística

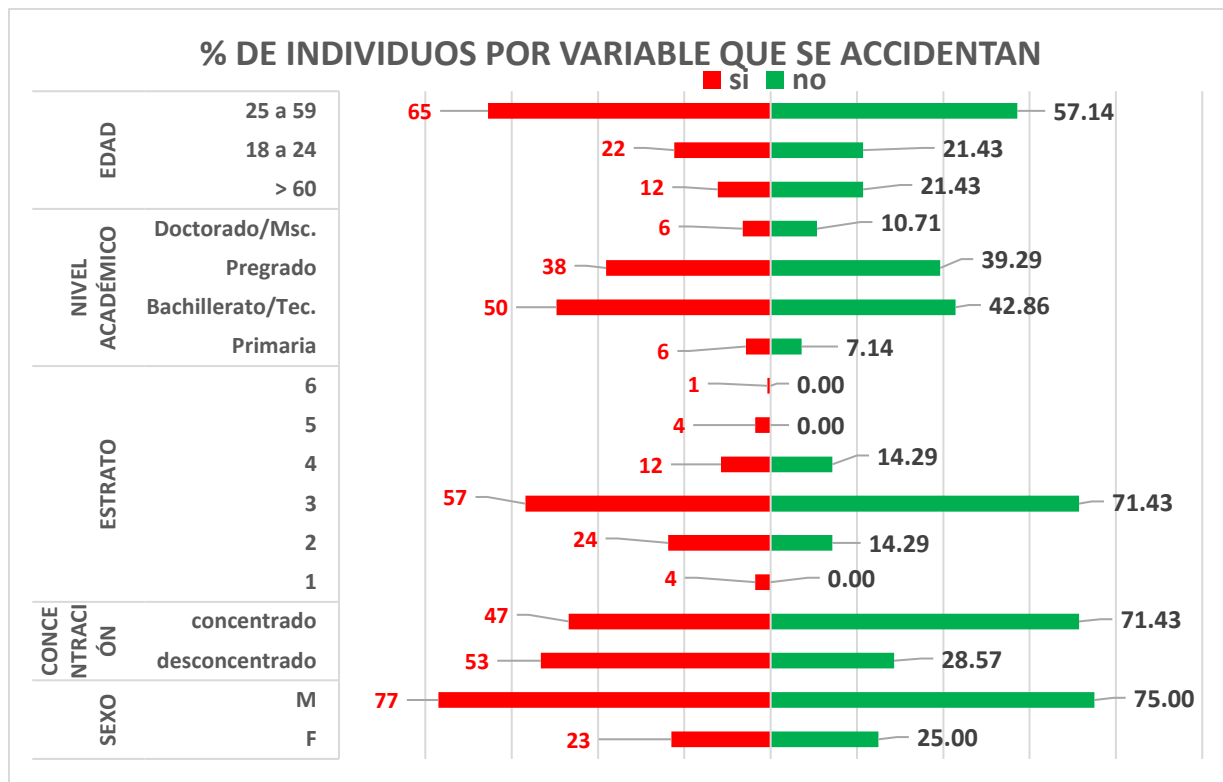
Los modelos de regresión logística buscan predecir la probabilidad de accidentes. A continuación se presentan los diferentes modelos obtenidos a partir de las variables demográficas y los datos de concentración analizando las variables más significativas en cada uno de los modelos.

Tabla 11 Parte descriptiva de accidentes por variables a analizar.

		TUVO ACCIDENTE						Fisher Exact Test	OR
		SI		NO		Total			
		n	%	N	%	n	%		
SEXO	F	32	23.0%	7	25.0%	39	23.4%	0.8096	0.90
	M	107	77.0%	21	75.0%	128	76.6%		
CONCENTRACIÓN	desconcentrado	74	53.2%	8	28.6%	82	49.1%	0.0222	2.85
	concentrado	65	46.8%	20	71.4%	85	50.9%		
ESTRATO	1	5	3.6%	0	0.0%	5	3.0%	0.6771	N/A
	2	33	23.7%	4	14.3%	37	22.2%		
	3	79	56.8%	20	71.4%	99	59.3%		
	4	16	11.5%	4	14.3%	20	12.0%		
	5	5	3.6%	0	0.0%	5	3.0%		
	6	1	0.7%	0	0.0%	1	0.6%		
NIVEL ACADÉMICO	Pregrado	53	38.1%	11	39.3%	64	38.3%	0.7417	N/A
	Primaria	8	5.8%	2	7.1%	10	6.0%		
	Bachillerato/Tec.	69	49.6%	12	42.9%	81	48.5%		
	Doctorado/Msc.	9	6.5%	3	10.7%	12	7.2%		
EDAD	> 60	17	12.2%	6	21.4%	23	13.8%	0.4009	N/A
	18 a 24	31	22.3%	6	21.4%	37	22.2%		
	25 a 59	91	65.5%	16	57.1%	107	64.1%		
Total general		139	100.0%	28	100.0%	167	100.0%		

La Figura 45 muestra la relación de porcentaje de individuos por variable que presentaron un accidente, esto quiere decir que, por cada una de las variables a analizar, se observa cuantos sujetos de cada una de estas variables, tuvieron un accidente de tránsito o no lo tuvieron, de acuerdo con el grado de concentración al momento de la ejecución de la prueba.

Figura 45 Relación de porcentaje de individuos por variable que presentaron un accidente.



Existen tres métodos de selección de variables para el análisis de datos, estos son el de pasos sucesivos (stepwise), el método de introducción progresiva (forward) y el método de eliminación progresiva (backward) los cuales se explican a continuación.

- La eliminación hacia atrás o *stepwise backward regression*: En este método se ingresan todas las variables en la ecuación y luego se van excluyendo cada una de ellas. En cada paso se elimina la variable de menos influencia de acuerdo con el contraste individual de la t o la F

- La selección hacia adelante o *stepwise forward regression*: En este método las variables se van introduciendo secuencialmente en el modelo. La primera variable que se introduce al modelo es la de mayor correlación con la variable dependiente. Esta variable se ingresa en el modelo solo si cumple con el criterio de entrada. Luego se considera la variable independiente donde la correlación parcial sea la mayor y que no se encuentre en la ecuación. Esta técnica finaliza cuando ya no existen variables que cumplan con el criterio de entrada.
- Pasos sucesivos o *stepwise regression*: Este método es una combinación de los dos métodos anteriores. En cada etapa se introduce la variable independiente que no está en la ecuación y que tenga la probabilidad para F más pequeña. Luego, las variables que se encuentran dentro del modelo de regresión se pueden eliminar del mismo. El proceso termina cuando se termina con las variables que pueden ser incluidas o eliminadas del modelo.

Al aplicar el modelo de regresión Stepwise forward, se obtuvieron los siguientes valores como se muestra en la Tabla 26, donde se hizo una relación entre el intercepto y la concentración, encontrando una asociación significativa o p-value de 0.0211, encontrando que la concentración es un factor que explica la accidentalidad. De la misma manera, la Tabla 13 muestra la significancia del modelo y se observa con el p-value. Para ello se utilizó el software Real Statistics V.7.0 de Marzo 2020, es el software R V.3.2.6 de Marzo 2020 para Excel.

La Tabla 12 contiene los valores explicados anterior y adicionalmente el intervalo de confianza (*lower y upper*)

Tabla 12 Stepwise Forward: Probabilidad de Accidentalidad

	<i>coeff b</i>	<i>s.e.</i>	<i>Wald</i>	<i>p-value</i>	<i>OR</i>	<i>lower</i>	<i>Upper</i>
Intercept	1.18	0.26	21.25	0.000	3.25		
conc. Norm.	1.05	0.45	5.37	0.021	2.85	1.17	6.90

En la Tabla 13 se observan los valores obtenidos de, X^2 , p-value, el área bajo la curva y la precisión del modelo

Tabla 13 Valores para el modelo de concentración.

Chi-Sq	5.84
p-value	0.016
AUC	0.87
Accuracy	0.83

La ecuación obtenida para este modelo se presenta a continuación al igual que la figura 46 muestra el área bajo la curva para este modelo obtenido. Esta ecuación representa la curva del modelo planteado en esta investigación.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-1.18 - 1.05x}}$$

Y la ecuación correspondiente al modelo de concentración es determinada por

$$Y = -1.18x_1 - 1.05x_2$$

Figura 46 Regresión logística con variable concentración

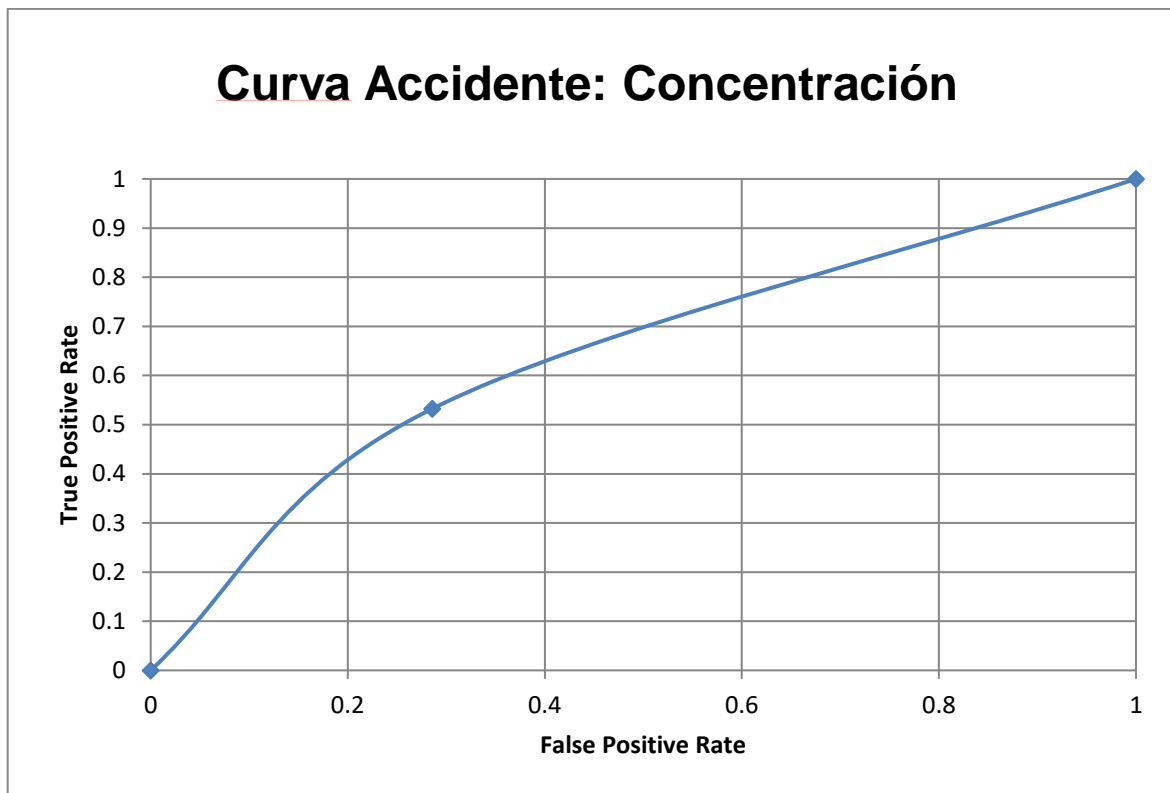
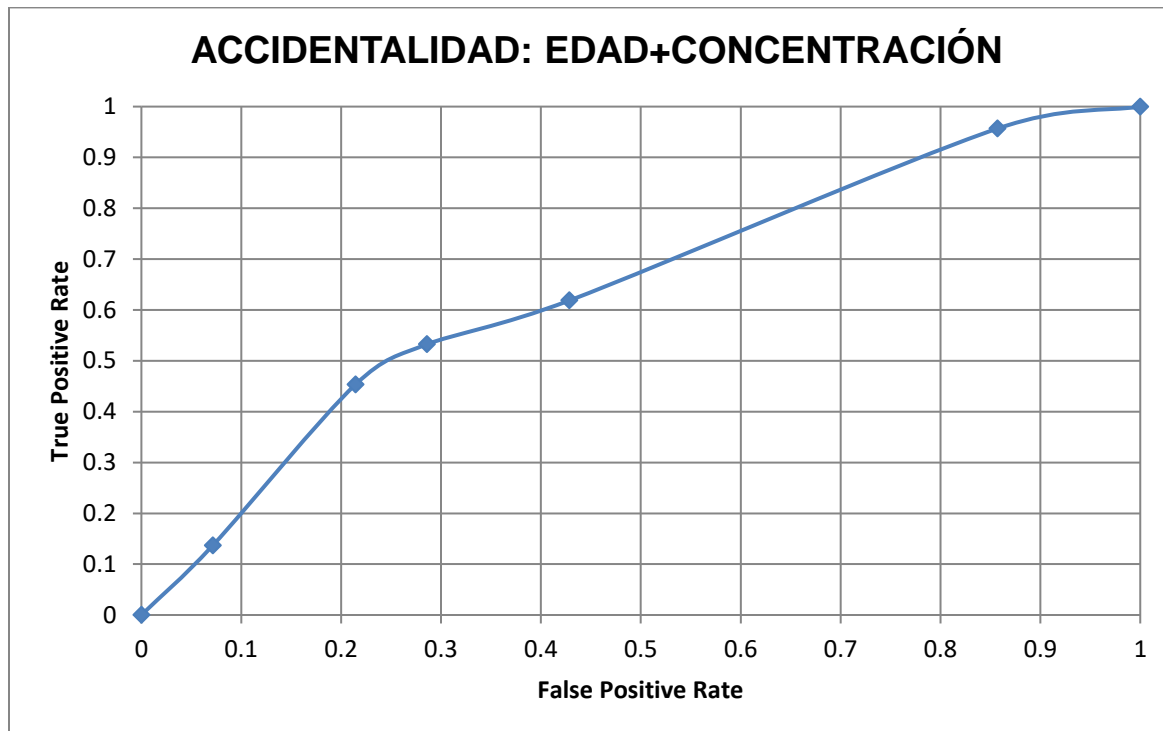


Tabla 14 Valores para el modelo de edad y concentración

Chi-Sq	6.48
p-value	0.0391
Hosmer	1.63
p-value	0.8035
Accuracy	0.83
AUC	0.75

La figura 47 muestra el área bajo la curva para el modelo obtenido con las variables edad y concentración. Se puede observar en la tabla 14 que el modelo predice con una precisión del 83% pero solo con el 75% de los participantes del experimento.

Figura 47 Regresión logística con variables edad y concentración



Las tablas 15, 16 y 17 presentan el modelo que se elaboró a partir de un análisis multiresolución de los 28000 datos promedio, convirtiéndolos en número que se pudiese incorporar en el modelo.

Tabla 15 Función de Concentración Instantánea

Concentración	Ventana de observación	Tiempo
ConcProm1	completa	
ConcProm2_1	primera mitad del tiempo	primeros 5 minutos
ConcProm2_2	segunda mitad del tiempo	últimos 5 minutos
ConcProm4_1	primer cuarto del tiempo	los primeros 2.25 minutos
ConcProm4_2	segundo cuarto del tiempo	los segundos 2.25 minutos
ConcProm4_3	del tercer cuarto del tiempo	los terceros 2.25 minutos
ConcProm4_4	cuarto del tiempo de observación	últimos 2.25 minutos
...
...
ConcProm15_16	penúltimo dieciseisavo del tiempo	los penúltimos 37.5 segundos
ConcProm16_16	ultimo dieciseisavo del tiempo	últimos 37.5 segundos

Tabla 16 16avos de análisis multiresolución

	<i>coeff b</i>	<i>s.e.</i>	<i>Wald</i>	<i>p-value</i>	<i>OR</i>	<i>lower</i>	<i>upper</i>
Intercept	26.78	6.75	15.75	0.0001	428,830,891,844.40		
Género	-0.23	1.37	0.03	0.8672	0.80	0.05	11.63
Estrato	-0.45	0.85	0.28	0.5938	0.64	0.12	3.34
Nivel educat	0.97	0.72	1.82	0.1774	2.64	0.64	10.82
Rango Etarec	-1.14	1.00	1.31	0.2516	0.32	0.04	2.25
conc. Norm.	-0.99	1.17	0.72	0.3963	0.37	0.04	3.68
Prom. 1/16	0.55	3.41	0.03	0.8715	1.73	0.00	1,374.11
Prom. 2/16	-2.83	3.61	0.61	0.4335	0.06	0.00	70.22
Prom. 3/16	-9.02	4.42	4.15	0.0415	0.0001	0.00	0.71
Prom. 4/16	-0.94	4.02	0.05	0.8158	0.39	0.00	1,033.52
Prom. 5/16	2.50	3.84	0.42	0.5150	12.14	0.01	22,335.12
Prom. 6/16	-3.95	4.83	0.76	0.4113	0.02	0.00	168.08
Prom. 7/16	-1.08	5.03	0.05	0.8295	0.34	0.00	6,471.70
Prom. 8/16	-0.58	5.50	0.01	0.9164	0.56	0.00	26,819.62
Prom. 9/16	-18.00	8.58	4.40	0.0360	0.00000002	0.00	0.31
Prom. 10/16	4.32	5.74	0.56	0.4524	74.88	0.00	5,798,775.30
Prom. 11/16	0.03	4.82	0.00	0.9952	1.03	0.00	13,146.01
Prom. 12/16	-3.95	4.61	0.73	0.3913	0.02	0.00	162.10
Prom. 13/16	-7.07	4.74	2.22	0.1362	0.00	0.00	9.28
Prom. 14/16	-1.97	4.62	0.18	0.6703	0.14	0.00	1,198.25
Prom. 15/16	2.03	4.37	0.22	0.6427	7.58	0.00	39,489.84
Prom. 16/16	-1.61	3.38	0.23	0.6325	0.20	0.00	148.55

Tabla 17 Valores para el modelo de análisis de multiresolución

Chi-Sq	112.39
p-value	7.187E-15
Hosmer	243.341
p-value	1.897E-05
Accuracy	0.970
AUC	0.974
Fisher Exact	3.07E-24
OR	570.833

$$p = \frac{1}{1 + e^{26.78 - 0.23x_1 - 0.45x_2 + 0.97x_3 - 1.14x_4 + 0.99x_5 + 0.55x_6 - 2.83x_7 - 9.02x_8 - 0.94x_9 + 2.5x_{10}}}$$

$$+ e^{-1.08x_{11} - 0.58x_{12} - 18x_{13} + 4.32x_{14} + 0.03x_{15} - 3.95x_{16} - 7.07x_{17} - 1.97x_{18} + 2.03x_{19} - 1.61x_{20}}$$

3.6.3. Modelos contruidos con árbol de decisión

En árbol de decisión es otro tipo de técnica de predicción de datos a partir de Machine Learning en la cual, el árbol va separando la variable más importante en que en ese caso es la concentración

Para comprobar que no se presenta sobreajuste en el modelo, en el campo del Auto Machine Learning se usan las matrices de confusión, Una **matriz de confusión** es una herramienta que permite visualizar el desempeño de un algoritmo de aprendizaje supervisado.

Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa a las instancias en la clase real., o sea en términos prácticos nos permite ver qué tipos de aciertos y errores está teniendo nuestro modelo a la hora de pasar por el proceso de aprendizaje con los datos.

Adicionalmente, se utiliza la validación cruzada: x5 y por 10 5 modelos que se entrenan con el 80% y se prueban con el 20% restantes escogidos al azar

A continuación se presenta un árbol de decisión de 10 nodos con su respectiva matriz de confusión y su validación cruzada, verificando la eficacia de la técnica y del modelo.

Figura 48 Árbol de decisión de 10 nodos

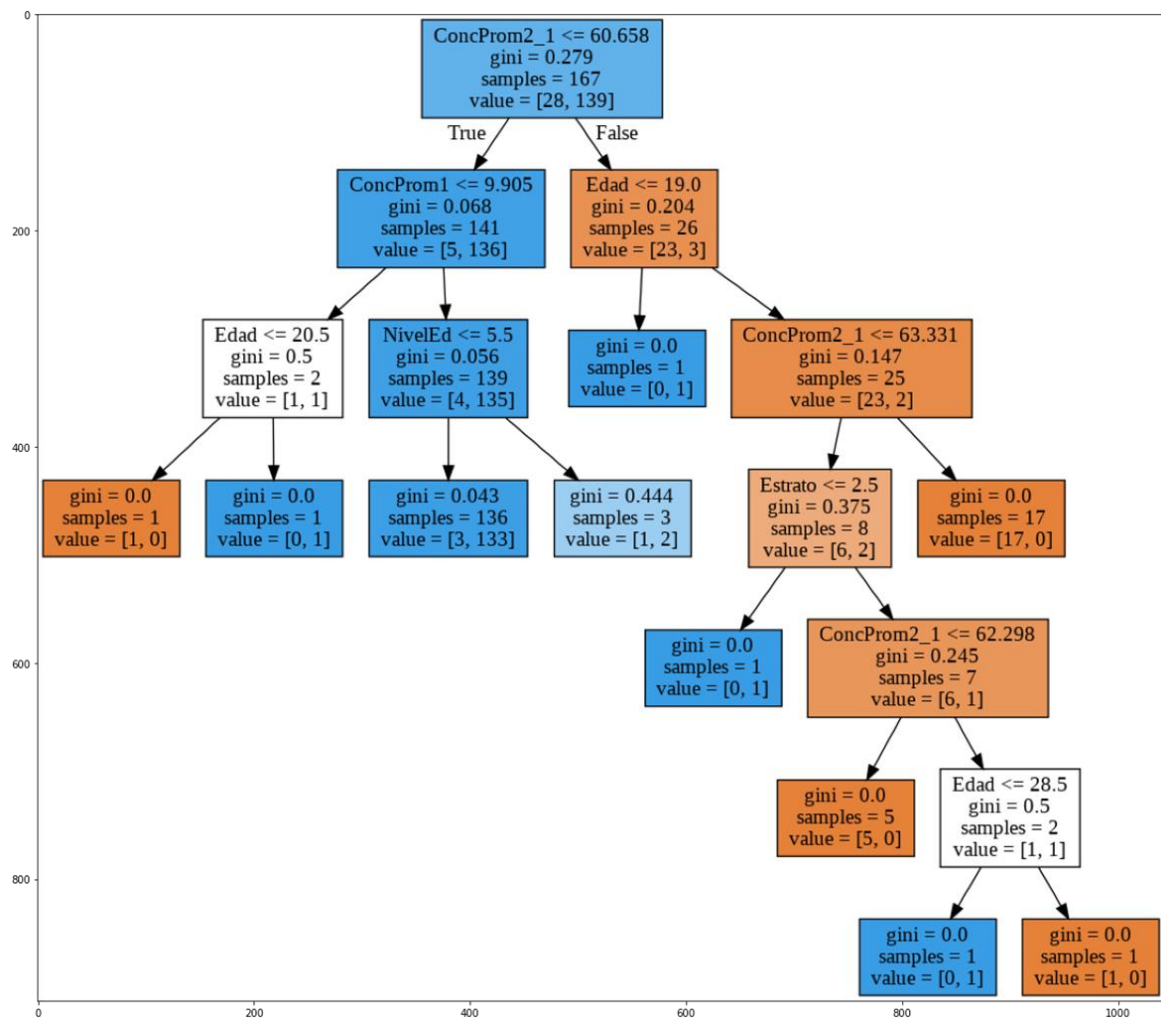


Figura 49 Matriz de confusión y validación cruzada del árbol de decisión de 10 nodos

```
0.9760479041916168
confusion_matrix
[[ 24   4]
 [  0 139]]
classification_report
      precision    recall  f1-score   support

     0       1.00      0.86      0.92         28
     1       0.97      1.00      0.99        139

 accuracy          0.98         167
 macro avg          0.99         167
 weighted avg       0.98         167

cross_val5
[1.          0.88235294 0.93939394 0.96969697 0.87878788]
cross_val5.mean
0.9340463458110516
cross_val10
[1.          1.          0.94117647 0.94117647 0.88235294 1.
 1.          0.875      0.9375      0.875      ]
cross_val10.mean
0.9452205882352942
```

El mejor modelo para predecir la accidentalidad o no accidentalidad se obtuvo con un árbol de decisión de 20 nodos con su respectiva matriz de confusión y su validación cruzada, verificando una vez mas, la eficacia de la técnica y del modelo.

Figura 50 Árbol de decisión de 20 nodos

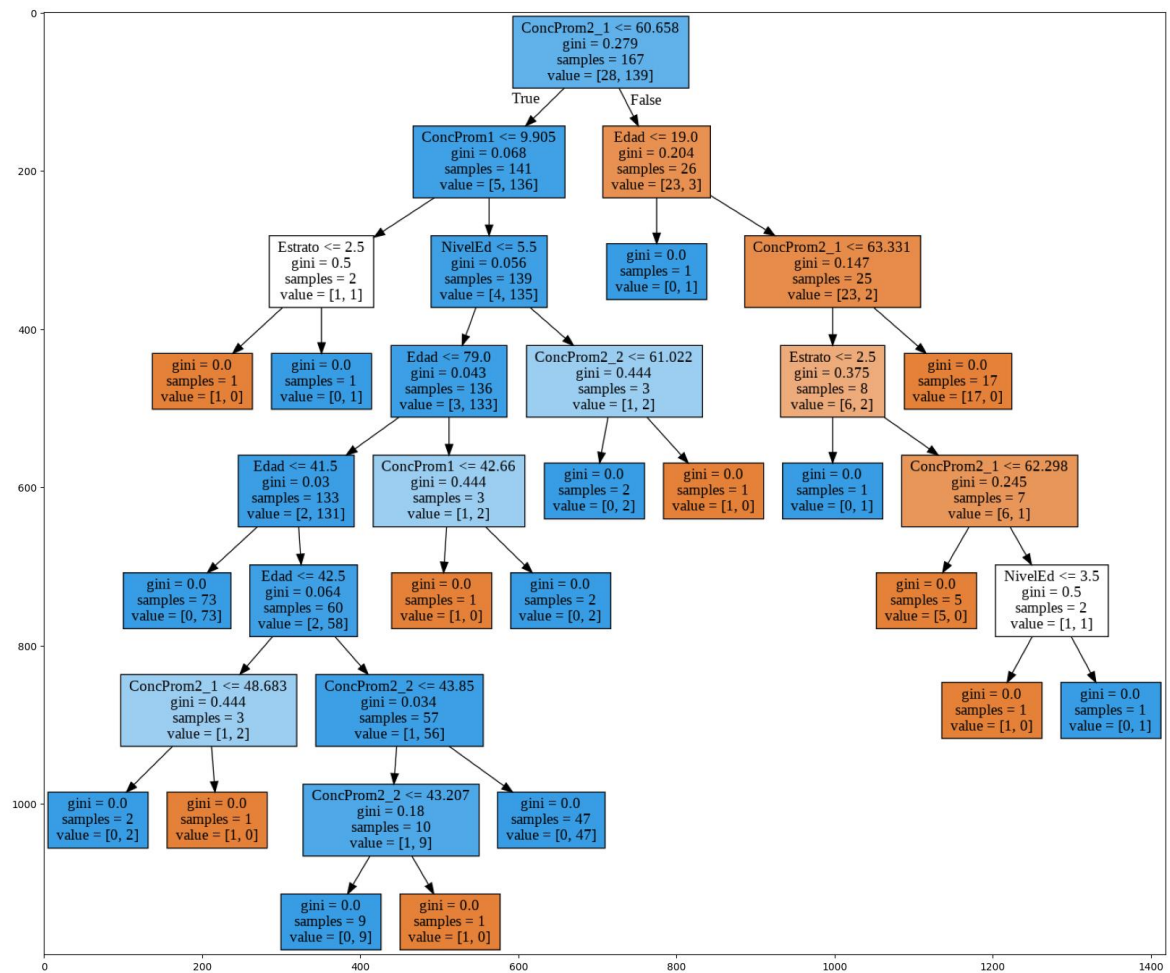


Figura 51 Matriz de confusión y validación cruzada del árbol de decisión de 20 nodos

```

1.0
confusion_matrix
[[ 28  0]
 [ 0 139]]
classification_report
              precision    recall  f1-score   support

      0       1.00      1.00      1.00        28
      1       1.00      1.00      1.00       139

 accuracy          1.00          1.00          1.00          167
 macro avg          1.00          1.00          1.00          167
weighted avg          1.00          1.00          1.00          167

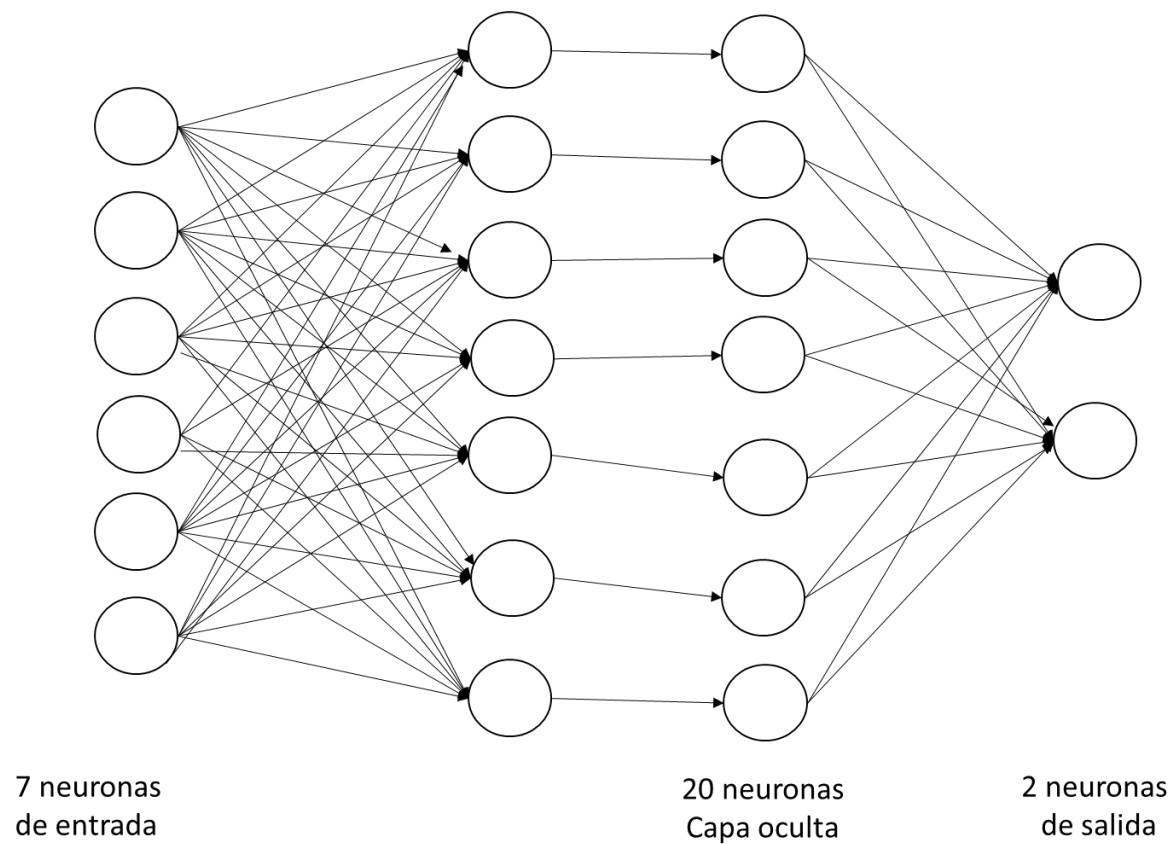
cross_val5
[0.91176471 0.94117647 0.90909091 0.84848485 0.87878788]
cross_val5.mean
0.8978609625668449
cross_val10
[0.88235294 0.94117647 0.94117647 0.94117647 0.82352941 1.
 0.94117647 0.875      0.9375      0.875      ]
cross_val10.mean
0.9158088235294117

```

3.6.4. Modelos contruidos con una red neuronal

En este tipo de modelos, que funcionan como tipo caja negra, específicamente para esta investigación doctoral, se elaboró un modelo de 7 neuronas de entrada, 2 capas ocultas de 20 neuronas cada una y una salida de 2 neuronas., el cual predijo con una precisión del 98.2%, como se presenta a continuación en las figuras 52, 53 y 54, resaltando que las variables más importantes, nuevamente son las concentraciones promedio.

Figura 52 Red neuronal multicapa



		0	1	Error	Rate
0	0	25.0	3.0	0.1071	(3.0/28.0)
1	1	0.0	139.0	0.0	(0.0/139.0)
2	Total	25.0	142.0	0.018	(3.0/167.0)

[illegible]

Variable Importance: H2O Deep Learning

Variable	Importance
Estrato	1.0
ConcProm1	0.96
ConcProm2_1	0.91
ConcProm2_2	0.84
NivelEd	0.54
Genero	0.54
Edad	0.33

La tabla 18 resume los modelos obtenidos por las diferentes técnicas utilizadas, con las variables de entrada y salida y sus respectivas precisiones.

Tabla 18 Modelos obtenidos

Tipo de Modelo	Variables	Precisión
Regresión logística	Concentración	83%
Regresión logística	Concentración, grupo etáreo	83%
Regresión logística	Concentración normalizada, 16avos de concentración, genero, edad, estrato, nivel educativo	97%
Árbol de decisión	Concentración promedio genero, edad, estrato, nivel educativo	100%
Red neuronal	Concentración promedio genero, edad, estrato, nivel educativo	98.2%

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones.

La desconcentración aporta de manera importante en la predicción de la probabilidad de accidente de tránsito de los conductores, porque se observó que el efecto acumulado de los mensajes de texto que generaron desconcentración incide en la generación de accidentes.

Los modelos elaborados muestran que son influenciados por la variable más importante que es la concentración.

Se logró implementar exitosamente un modelo predictivo basado en Machine Learning.

Se midió exitosamente el nivel de concentración que es uno de los más difíciles de medir en este tipo de experimentos.

Se observó que al plantearse el modelo de comportamiento simple, las únicas variables que inciden son la edad, el grado de concentración de los conductores, obteniendo precisiones del modelo del 83 al 100%.

El 70.1% del total de los participantes del género masculino estuvieron concentrados y el 26.9% desconcentrados, el género femenino, el 58.9% de las participantes estuvieron concentradas y 42.04% desconcentradas durante la ejecución del experimento.

El factor que no está contemplado en el estudio del comportamiento y que es el más importante y más difícil de estudiar es el nivel de concentración, el cual ha sido medido y analizado en esta investigación doctoral.

El mejor modelo obtenido es un árbol decisión de 20 nodos con una precisión de predicción (accuracy) del 100% y cuya generalización es de 90% y 91% medida con validaciones cruzadas x5 y x10, en este modelos las dos variables más importante es la concentración promedio.

Se probaron múltiples modelos predictivos obtenido usando AutoML (regresión logística, GLM binarios, GBM, redes neuronales y Decission tree).

1.18 es la constante modal y 1.05 es el parámetro que acompaña la concentración. 1.18 representa todo lo que no es observable ni medible. Explica concentración o desconcentración en conductores y que generan accidentes al momento de ir conduciendo.

Este tipo de tecnología se podría instalar en los vehículos de manera muy económica con un chip que permita medir la concentración de conductores.

La ecuación de este modelo de comportamiento está definida por la siguiente expresión:

$$Y= 1.18x_1+ 1.05x_2$$

Esta ecuación es el resultado de haber podido medir el factor más importante del comportamiento humano y es la conducta, a través de la atención y concentración de los conductores que participaron en el experimento.

Se encontró que con solo coeficientes de Wavelets de Haar de la Función de Concentración Instantánea FCI (el promedio de la función) y se probaron múltiples modelos predictivos obtenido usando AutoML (regresión logística, GLM binarios, GBM, Deeplarning y Tpot) pueden ser capaces de predecir la accidentalidad con validación

cruzada 5-fold la ocurrencia de accidentes en el experimento con una precisión de entre 85% al 100%.

Para cumplir con este propósito, se implementó una metodología especialmente desarrollada que consistió en 4 etapas

- La primera etapa se refirió a una revisión exhaustiva del estado del conocimiento que cubre completamente los temas de investigación examinados.
- En la segunda etapa, se realiza una revisión metodológica sobre la conducción, los simuladores de conducción y estudios relacionados al comportamiento humano en pruebas simuladas.
- En la tercera etapa se diseñó cuidadosamente un gran experimento de simulador de conducción y fue implementado para la obtención de datos.
- En la cuarta etapa se desarrolla una innovadora metodología de análisis por medio de redes neuronales que relacionan a áreas del conocimiento como son el comportamiento humano, la inteligencia artificial y la ingeniería de transporte.

El resultado innovador de esta tesis doctoral consistió en el aporte a la ciencia en cuatro contribuciones científicas adicionales. La primera se refiere a la contribución metodológica de la investigación.

La primera contribución científica adicional consistió en el diseño y la implementación de un experimento riguroso en un simulador de conducción y el cual fue fortalecido con un riguroso estado del conocimiento, donde se explican las fortalezas y debilidades del uso de simuladores de conducción y los estudios previos sobre los temas de distracción de conductores.

En esta contribución se utilizó una muestra poblacional de 167 personas que condujeron en un simulador de conducción bajo las mismas condiciones: Adicionalmente, se realizó un análisis de la información en un apropiado balance con la muestra, teniendo en cuenta el género, y la distribución por grupos de edad.

En este experimento con el simulador de conducción, los participantes fueron sometidos a un efecto distractor causado por el envío de mensajes utilizando el servicio de mensajería

instantánea *Whatsapp*, y los otros factores analizados en la prueba de conducción fueron las características del conductor como la edad, género, nivel educativo y estrato socioeconómico.

La segunda contribución científica doctoral adicional de esta tesis es el análisis del comportamiento de conductores por medio de la medición de ondas cerebrales y el análisis de las mismas por medio del uso de inteligencia artificial, usando redes neuronales, y Machine Learning, donde se analiza el comportamiento de conductores ante un efecto distractor mientras conduce en el simulador de conducción, evaluando adicionalmente los errores cometidos en el desempeño al conducir durante la prueba.

La tercera contribución científica doctoral adicional consiste en la medición del efecto distractor por el uso del servicio de mensajería instantánea *Whatsapp*, mientras se conduce en el simulador de conducción, evaluando el comportamiento y las conductas riesgosas que pueden cometerse por observar mensajes mientras se conduce.

Finalmente, La cuarta contribución científica doctoral adicional consiste en el desarrollo de un modelo de comportamiento por medio del uso de la regresión logística, la comprobación del modelo por medio de un modelo econométrico y como medida de comprobación, del uso de inteligencia artificial, en el cual se evaluaron las conductas riesgosas mientras los sujetos de la prueba conducían en el simulador de conducción, evaluando los errores y creando un modelo que determina a partir de un umbral, si el conductor en la prueba se encuentra concentrado o desconcentrado al momento de conducir en el simulador. También se evaluó si el incremento del riesgo accidentes incide por la distracción del conductor por estar observando los mensajes recibidos por *Whatsapp* como el factor principal o influyen otros errores al conducir.

Se clasificaron y caracterizaron las conductas riesgosas de conductores al ser sometidos a un factor distractor, sin importar el género ni la edad y que de alguna manera influyeron en el comportamiento al momento de conducir el escenario recreado.

Se observó que los conductores que hicieron el experimento con vehículo con transmisión mecánica presentaron mayores dificultades y por ende, se distraen más fácilmente, al momento de recibir mensajes de *Whatsapp* por el celular, cometiendo equivocaciones más recurrentes que los conductores que prefieren la transmisión automática.

Se observó que las personas mayores de 50 años tienden a no revisar el celular mientras están conduciendo, mientras que las personas entre el rango de 18 a 45 años revisan el celular y en varias ocasiones, contestan los mensajes mientras están conduciendo, afectando el grado de concentración al momento de la prueba y presentando errores de conducción y accidentes de manera más recurrente.

El grupo que más incide en el modelo de comportamiento se encuentra en el rango de los 16 a los 24 años,

Es posible hallar resultados y tendencias más concluyentes si se aumenta el tamaño de la muestra poblacional en cada uno de los rangos de edad, estrato socioeconómico y nivel de estudios para ejecutar los análisis estadísticos necesarios para que el comportamiento de la muestra sea el de una distribución normal y analizar el comportamiento de los conductores en los diferentes errores que se cometen al conducir.

El modelo de comportamiento propuesto se compone de un modelo clasificador, que luego es utilizado, de acuerdo con la presencialidad o no de un accidente, la probabilidad que ocurra un accidente frente al efecto distractor ocasionado por *Whatsapp* y con las características que se presentan en el escenario utilizado por los participantes del experimento.

El modelo logístico y econométrico obtenido, depende del grado de concentración de los conductores, del grupo etéreo y varía, dependiendo del escenario, de las condiciones climáticas, el tipo de carretera, la hora en la que se conduce, el tipo de vehículo y el tipo de transmisión en la cual se conduce.

Se observó que al plantearse el modelo de comportamiento simple, las únicas variables que inciden son la edad el grado de concentración de los conductores, obteniendo una precisión del modelo del 83%, pero al realizar nuevos análisis, en los cuales se obtienen los 16avos de los promedios de concentración de cada uno de los participantes, al analizar y generar el modelo usando regresión logística con el programa Real Statistics y verificando el modelo obtenido con un modelo econométrico, se obtuvo una precisión del 98% y como método de comprobación, utilizando Machine Learning, el modelo obtiene una precisión del 97%, , hasta llegar a modelos de predicción de un 100%, teniendo en cuenta las variables edad, estrato socioeconómico, género y nivel educativo.

El comportamiento de los conductores en los rangos de edad de los 59 a los 90 años de edad disminuye significativamente, mostrando un grado de concentración al momento de conducir, sin embargo, sería de mucho interés analizar el comportamiento en estos rangos estratificados con muestras poblacionales más grandes y significativas.

Finalmente, el uso del celular mientras se conduce en la ejecución de la presente investigación, presenta un efecto negativo que se vio reflejado en los resultados del análisis del modelo propuesto. No solo el hablar por teléfono, ya sea por altoparlante o tecnología *bluetooth*, si no el recibir mensajes y el sonido que genera el celular en el momento de la recepción del mensaje, afecta el grado de concentración y, por lo tanto, el comportamiento de los conductores durante un recorrido en la vía.

Recomendaciones

Para investigaciones futuras, se propone utilizar los diferentes escenarios que ofrece el programa del simulador de conducción, concentrándose en grupos específicos de rangos etáreos y años de experiencia de conducción.

Se propone concentrarse en rangos específicos de edad en los cuales se observaron la mayor cantidad de errores y diseñar experimentos que permitan obtener datos para realizar los análisis correspondientes y observar si las tendencias son similares o difieren a lo hallado en esta investigación doctoral.

También se recomienda estudiar otros factores distractores, en vías urbanas, rurales, de día de noche, con diferentes condiciones climáticas, para ver el comportamiento de los conductores y analizar si varía con lo obtenido en esta investigación doctoral.

Se puede continuar la investigación, analizando el efecto del alcohol y el uso del celular en el comportamiento de conductores, usando el escenario de conductores con grado de alcohol y analizar resultados y tendencias en el comportamiento de conductores.

.

Bibliografía

AASHTO. 2004. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C., USA.

Af Wåhlberg, A.E., 2012. Changes in driver acceleration behavior over time: Do drivers learn from collisions? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(5), pp.471–479.

Alonso G. et al (2004), Entrenamiento de una red neuronal artificial usando el algoritmo simulated annealing, Revista Scientia et Technica. Año X, No 24, Mayo 2004. UTP. ISSN 0122-1701 .

Agencia Nacional de Seguridad Vial, Observatorio Nacional de Seguridad Vial. página web <https://ansv.gov.co/observatorio/index.html> recuperada el 24-11-2019.

Alicea, L. 2004. Analysis and Evaluation of Crashes Involving Pedestrians in Puerto Rico. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Recinto Universitario de Mayagüez, Universidad de Puerto Rico.

Alonso, M., 2016. La integración del factor humano en el ámbito técnico de la gestión de las carreteras y la seguridad vial: Un enfoque investigativo. Available at: <http://roderic.uv.es/handle/10550/51943>.

Arias, W., Colucci, B., 2006. Road Safety Audit. , Newsletter El puente, 19(3), p.28.

Bear, F., Connors. W, 2002. Neurociencia, explorando el cerebro, Editorial Masson, Barcelona.

Bella, F., 2014. Effects of Combined Curves on Driver's Speed Behavior: Driving Simulator Study. *Transportation Research Procedia*, 3, pp.100–108.

Ben-Bassat, T. & Shinar, D., 2011. Effect of shoulder width, guardrail and roadway geometry on driver perception and behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 43(6), pp.2142–2152.

Benekohal, R.F., Hashmi, A.M. 1992, Procedures for estimating accident reductions on two-lane highways, *Journal of Transportation Engineering*, 118 (1), pp. 111-129.

Breen, J., 2009. Car telephone use and road safety, an overview prepared for the European Commission, European Commission.

- Breiman, L., 2001. Statistical modeling: the two cultures. *Statistical Science* 16, 199–231
- Briem, V., & Hedman, L. R. (1995). Behavioural effects of mobile telephone use during simulated driving. *Ergonomics*, 38(12), 2536-2562.
- Brookhuis, K.A., de Vries, G., de Waard, D., 1991. The effects of mobile telephoning on driving performance, *Accident Analysis & Prevention* 23(4), 309-316.
- Bruyas, M., Corinne Brusque, Sandrine Debailleux, Max Duraz, Isabelle Aillerie, 2009, Does making a conversation asynchronous reduce the negative impact of phone call on driving?, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*
- Burgeois JP, Goldman-Rakic PS, Rakic P. 1994, Synaptogenesis in the prefrontal cortex of rhesus monkeys. *Cereb Cortex*; 4: 78-96.
- Carmona, E., 2014, Tutorial sobre Máquinas de Vectores Soporte (SVM) Dpto. de Inteligencia Artificial, ETS de Ingeniería Informática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), C/Juan del Rosal, 16, 28040-Madrid (Spain)
- Chaves S, E.W.V. (2012). () "*Mecánica del Medio Continuo. Conceptos Básicos*".3ª Edición, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería - CIMNE - Barcelona. ISBN: 978-84-96736-38-2.
- Cherri, C., Nodari, E., Toffetti, A. (2004). AIDE Subproject 2: Review of existing tools and methods (Tech. Inf.), Information Society Technologies Programme " Adaptive integrated driver-vehicle interface" (AIDE)
- Cobos, C. Modelo de un meta buscador que realiza agrupación de documentos web, enriquecido con una taxonomía, ontologías e información del usuario, tesis doctoral Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- Colab (2020), What is Colaboratory? página web disponible para ejecución de pruebas en <https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb#>
- Córdoba, J.E., (2011) Modelo de elección discreta integrando variables latentes y racionalidad limitada, tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Dans. E. Disponible en: <http://www.enriquedans.com/2011/10/big-data-una-pequena-introduccion.html>, 2011.
- DataSmart, (2020), Automachine Learning con Tpot, consulta realizada el 9 de junio de 2020, disponible en <https://datasmarts.net/es/automl-con-tpot/>
- De la Fuente, S. (2011), Regresión logística, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Autónoma de Madrid, pp. 2-29.
- Duchek, J. M., Hunt, L., Ball, K., Buckles, V., Morris, J.C., 1998. Attention and driving performance in Alzheimer's disease. *Journal of Gerontology Series B, Psychological Sciences and Social Sciences*, 53, 130-141

- Ellison, A.B., Greaves, S.P. & Bliemer, M.C.J., 2015. Driver behaviour profiles for road safety analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 76, pp.118–132.
- Elvik R, Vaa T., 2004. The handbook of road safety measures. Amsterdam, Elsevier Science.
- Engelbrecht, A.P., 2007. Computational Intelligence. An Introduction, second ed. Wiley, NY.
- Engström, J., Johansson, E., Östlund, J., 2005. Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8, 97-120
- Evans, L., 2004. Traffic safety. Bloomfield Hills, MI: Science Serving Society.
- P. Fancher, R. Ervin, J. Sayer, M. Hagan, S. Bogard, Z. Bareket, M. Mefford, J. Haugen, Intelligent cruise control field operational test. Technical report, University of Michigan-Transportation Research Institute, 1998 May.
- Ferrer, A., Smith, R. & Cuellar, M., 2013. Análisis de la Capacidad de Gestión de la Seguridad Vial. *Banco Mundial*, pp.92–93.
- Figueroa, A., 2005. Speed factors on four lane highways in free flow conditions *Doctoral thesis*. Purdue University
- Figueroa, A., Kong, S., A. Tarko. 2005. Roadway and Driver Factors of Risk Perception on Four-Lane Highways, International: Road Safety on Four Continents, Warsaw, Poland.
- Figueroa, A., Colucci, B. Arias, W. 2006, Sistema de Gerencia en Seguridad Vial: Integrando la Planificación, el Diseño Geométrico y la Auditoria de las Carreteras Primera cumbre puertorriqueña de seguridad vial, San Juan, , Puerto Rico, USA, 2006
- Fire, M. et al., 2012. Data mining opportunities in geosocial networks for improving road safety. *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEEI 2012*.
- Freund, B., Gravenstein, S., Ferris, R., Burke, B., Shaheen, E., 2005. Drawing clocks and driving cars: Use of Brief Tests of Cognition to Screen Driving Competency in Older Adults. *J Gen Intern Med*. 20 (3), pp. 240-4.
- Gallegos, M. Gorostegui, M.E., Procesos cognitivos metodologia-de-la-investigacion/procesos-cognitivos, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1990.
- Georgiou, T. et al., 2015. Mining Complaints for Traffic-Jam Estimation. *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2015 - ASONAM '15*, pp.330–335.
- Gibson, J.J., 1986. The ecological approach to visual perception. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Glymour, C., Madigan, D., Pregibon, D., Smyth, P., 1997. Statistical themes and lessons

for data mining. *Data Mining and Knowledge Discovery* 1 (1), 11–28.

Godley, S.T., Triggs, T.J., and Fildes, B.N., 2002. Driving simulator validation for speed research, *Accident Analysis and Prevention* 34 (5), 589-600.

Gómez, E. 2017, concepto, metáforas, modelos y bases cerebrales de la atención, Universidad de Granada, 77 pág.

Gu, Y., Qian, Z. (Sean) & Chen, F., 2016. From Twitter to detector: Real-time traffic incident detection using social media data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, pp.321–342.

Gustafson, E. 1998. Gender Differences in Risk Perception: Theoretical and Methodological Perspectives. *Risk Analysis*, Vol. 18, No. 6, pp. 805-811.

Haigney, D.E., Taylor, R.G., Westerman, S.J., 2000. Concurrent mobile (cellular) phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes. *Transportation Research Part F*, 3, 113-121.

Hamdar, S.H. & Schorr, J., 2013. Interrupted versus uninterrupted flow: a safety propensity index for driver behavior. *Accident; analysis and prevention*, 55, pp.22–33. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457513000420> [Accessed March 11, 2016].

Hand, D.J., 2000. Data mining, new challenges for statisticians. *Social Science Computer Review* 18 (4), 442–449

Hassan, H.M. & Abdel-Aty, M.A., 2013. Exploring the safety implications of young drivers' behavior, attitudes and perceptions. *Accident Analysis and Prevention*, 50, pp.361–370.

Hauer, E. 1990. The engineering of safety and the safety of engineering. Challenging the Old Order -Towards New Directions in Traffic Safety Theory, J.P. Rothe, ed., Transaction, New Brunswick.

Haykin, S., 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Macmillan, NY.

Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J., Brown, J., 2006. Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, n.38, pp.185-191.

Huttenlocher PR, Dabholkar AS. 1997, Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *J Comp Neurol*; 387: 167-78.

Iversen, H.H. & Rundmo, T., 2012. Changes in Norwegian drivers' attitudes towards traffic safety and driver behaviour from 2000 to 2008. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(2), pp.95–100.

Izaurieta, F. y Saavedra, C. 2015.. *Redes Neuronales Artificiales*. Dpto. de Física, U. de Concepción, Chile. <http://www.uta.cl/charlas/volumen16/Indice/Ch-csaavedra.pdf>

Jacobson, D. Brail G. Woods, D., 2012. *APIs: A Strategy Guide* First rele., Sebastopol, CA.: O'Reilly Media Inc. Available at: www.oreilly.com.

Jamson, A.H., 2001. Image characteristics and their effect on driving simulator validity. Proceedings of the first international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design (pp.190-195). Aspen, CO.

Jiang, Shan, Yang, Yingxiang Gupta, Siddharth, Veneziano, Daniele Athavale, Shounak González, Marta C. 2016, The Timegeo modeling framework for urban mobility without travel surveys, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

Johnston, I. 2006. Highway Safety. En: The Handbook of Highway Engineering. CRC Press.

Jovović, I., Peraković, D., & Husnjak, S. (2018). The Impact of Using Modern Information and Communication Equipment and Services on Driving Safety. *Promet-Traffic&Transportation*, 30(5), 635-645

Khan, I., Khusro, S., & Alam, I. (2019, July). Smartphone Distractions and its Effect on Driving Performance using Vehicular Lifelog Dataset. In *2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* (pp. 1-6). IEEE

Kass, S., Beede, K., 2007. Engrossed in Conversations: The impact on cell phones on simulated driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, 38, 415.

Kaptei, N.A., Theeuwes, J., van der Horst, R., 1996. Driving simulator validity: some considerations, *Transportation Research Record* 1550, 30, 1996.

Karlaftis, M.G, Vlahogianni E.I., 2010 Statistical methods versus neural networks in transportation research, *Transportation Research part C*,

Khoo, H.L. & Asitha, K.S., 2016. Quantifying impact of traffic images applications (APPS) on travel choices. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2), pp.899–912.

Kircher, K., 2007. Driver distraction - A review of the literature. VTI Report 594A. VTI, Linköping, Sweden.

Kuan, Ch.-M., White, H., 1994. Artificial neural networks: an econometric perspective. *Econometric Reviews* 13 (I), 1–9

Kummetha, V., Kondyli, A., Chrysikou, E., Schrock, S. 2020, Safety analysis of work zone complexity with respect to driver characteristics — A simulator study employing performance and gaze measures, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 142, ISSN 0001-4575,

LaBerge, D., 1997. Attention, awareness, and the triangular circuit. *Consciousness and Cognition*, 6, 148-181.

Lancheros-Cuesta, J. L. Ramirez. Y. Forero and A. C. Duran, "Evaluation of e-learning activities with NeuroSky MindWave EEG," *2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Caceres, 2018, pp. 1-6.

Ledesma, R. D., Poó, F. M., Montes, S. A. 2011, Psicología del tránsito: logros y desafíos de la investigación. *PSIENCIA. Revista Latinoamericana de Ciencia Psicológica* ISSN: 2250-5490. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333127105007>

Luce, D. (1959), Individual Choice Behavior, John Wiley and Sons, New York

Luna del Castillo, J.D., Andrés, A.M. Tablas 2x2 y test exacto de Fisher. *TDE* 2, 15–43 (1987). <https://doi.org/10.1007/BF02864816>

Ma, R., Kaber, D. 2005. Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 939-953

McFadden, D. (1974), 'Conditional logit analysis of qualitative choice behavior', in P. Zarembka, ed., *Frontiers in Econometrics*, Academic Press, New York, pp. 105–142

Markkula, G., Romano, R., Waldram, R., Giles, O., Mole, C., Wilkie, R., 2019 Modelling visual-vestibular integration and behavioural adaptation in the driving simulator, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Volume 66, Pages 310-323, ISSN 1369-8478

Marschak, J. (1960), 'Binary choice constraints on random utility indications', in K. Arrow, ed., *Symposium on Mathematical Methods in the Social Sciences*, Stanford University Press, Stanford, CA, pp. 312–329

MATLAB, 2017 Users Manual, Mathworks Inc, www.mathworks.com

Matthews, R., Legg, S., & Charlton, S. (2003). The effect of cell phone type on drivers' subjective workload during concurrent driving and conversing. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 441-450.

McEvoy, S.P., Stevenson, M.R., McCartt, A.T., Woodward, M., Haworth, C., Palamara, P., Cercarelli, R., 2005. Role of mobile phones in motor vehicle crashes resulting in hospital attendance: a case-crossover study. *BMJ*, Aug. 20; 331(7514):428, Epub 2005.

McKnight A.J., McKnight A.S. (1993). The effect of mobile phone use upon driver attention. *Accident Analysis and Prevention* 25, 259-265. Mallikarjuna, C., Rao, K. R. (2006). Area occupancy characteristics of heterogeneous traffic. *Transportmetrica*, 2(3), 223–236

Murillo, M. (2003). Modelo de Comportamiento de Conductores de Automóviles Usando Razonamiento Basado en Contextos. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação*, 2(2).

Muscant, O., Lotan, T. & Albert, G., 2015. Do we really need to use our smartphones while driving? *Accident; analysis and prevention*, 85, pp.13–21.

National Center for Statistics and Analysis (NCSA). 2006a. Race and Ethnicity in Fatal Motor Vehicle Traffic Crashes 1999-2004. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.

National Center for Statistics and Analysis (NCSA). 2006. Puerto Rico Toll of Motor Vehicle Crashes, 2005. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.

National Center for Statistics and Analysis (NCSA). 2005. Traffic Safety Facts 2004. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.

- Nicholls, D., 1999. Statistics into the 21st century. Australia & New Zealand, Journal of Statistics 41 (2), 127–139.
- Norza, E. Useche, S. Moreno, J. Granados, E. Romero, M., 2014. Componentes descriptivos y explicativos de la accidentalidad vial en Colombia: incidencia del factor humano. *Revista Criminalidad*, 56(1), pp.157–187.
- Olsen, E.C.B., Lerner, N., Perel, M., Simmons-Morton, B.G., 2005. In-car electronic device use among teen drivers. In: Paper presented at the Transportation Research Board Meeting, Washington, DC.
- Ortiz, C., Ortiz-Peregrina, S., Castro, J. J., Casares-López, M., & Salas, C. (2018). Driver distraction by smartphone use (WhatsApp) in different age groups. *Accident Analysis & Prevention*, 117, 239-249
- Okamoto, K. , Tsiotras, P. 2019, Data-driven human driver lateral control models for developing haptic-shared control advanced driver assist systems, Robotics and Autonomous Systems, Volume 114, Pages 155-171, ISSN 0921-8890
- Oviedo-Trespalacios, O., King, M., Vaezipour, A., & Truelove, V. (2019). Can our phones keep us safe? A content analysis of smartphone applications to prevent mobile phone distracted driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 60, 657-668.
- Policía Nacional de Colombia, Dirección de Tránsito 2018, Base de datos de fatalidades de 1 de enero de 2011 a 31 de diciembre de 2017, información suministrada a solicitud del autor de esta tesis doctoral.
- Papantoniou, P. Risk factors, driver behaviour and accident probability. The case of distracted driving., Doctoral thesis, National Technical University of Athens, 2015.
- Parasuraman, R., Nestor, P.G., 1991. Attention and Driving Skills in Aging and Alzheimer's disease, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 33, no. 5, 539-557.
- Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A.A., Jarawan, E., Mathers, C., 2004, World report on road traffic injury prevention. Geneva, World Health Organization.
- Pentland, A., & Liu, A. (1999). Modeling and prediction of human behavior. *Neural computation*, 11(1), 229–242. <https://doi.org/10.1162/089976699300016890>
- Petridou, E., Moustaki, M., 2000. Human factors in the causation of road traffic crashes, European Journal of Epidemiology, 16, pp 819-826.
- Pollatsek, A., Fisher, D.L., Pradhan, A.K., 2006. Identifying and remediating failures of selective attention in younger drivers. *Current directions in Psychological Science*, 15, 255-259.
- Proakis, J. Manolakis, D., 1997, Tratamiento digital de señales, Prentice Hall.
- Raajan, Narasimhan & Isra, A.R. & Greeta, S & Hemapriya, N & Narayan, S.K.G. & Madhupriya, G & Hariharan, K. (2018). Driver fatigue detection using neurosky mindwave headset. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 119. 16383-16388

Rakauskas, M. E., Gugerty, L.J., Ward, N.J., 2004. Effects of naturalistic cell phone conversations on driving performance, *Journal of Safety Research* 35 (4), 453-464, 2004.

Ram, T. & Chand, K., 2016. Effect of drivers' risk perception and perception of driving tasks on road safety attitude. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*.

Redelmeier DA, Tibshirani RJ., 1997 Association between cellular-telephone calls and motor vehicle collisions, *The New England Journal of Medicine*, Volume 336, number 7.

Regan, M.A., Lee, J.D., Young, K.L. (Eds.), 2008. *Driver Distraction: Theory, Effects, and Mitigation*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 31–40.

Reger, M.A., Welsh, R.K., Watson, G.S., Cholerton, B., Baker, L.D., Craft, S., 2004. The relationship between neuropsychological functioning and driving ability in dementia: a meta-analysis. *Neuropsychology* 18, 85-93.

Rehmann, A.J., Mitman, R.D., Reynolds, M.C., 2010. *A Handbook of Flight Simulation Fidelity Requirements for Human Factors Research*, Report No. DOT/FFF/CT-TN95/46, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ.

Reimer, B., Mehler, B., D'Ambrosio, L. A., & Fried, R. (2010). The impact of distractions on young adult drivers with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Accident Analysis and Prevention*, 42(3), 842–851. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.021>

Roman, G.D. et al., 2015. Novice drivers' individual trajectories of driver behavior over the first three years of driving. *Accident Analysis & Prevention*, 82, pp.61–69.

Rubiano, A. 2016. Smart control of soft robotic hand, Doctoral thesis, Université Paris Quest Narrente,

Rumar, K. 1985. The Role of Perceptual and Cognitive Filters in Observed Behavior. En: *Human Behavior in Traffic Safety*. Evans and Schwing, Plenum Press.

Sadek, A.W., Spring, G., Smith, B.L., 2003. Toward more effective transportation applications of computational intelligence paradigms. *Transportation Research Record* 1836, 57–63

Sagberg, F., 2001. Accident risk of car drivers during mobile telephone use. *Int.J. Vehicle Design* 26, 57–69.

Salgado, M. Oracle apuesta por Big Data con tecnología y proyectos. Disponible en: <http://www.computerworld.es/big-data/oracle-apuesta-por-big-data-con-tecnologia-y-proyectos>, 2014

Sarle, W.S., 1994. Neural networks and statistical models. In: *Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference* (April 1–13).

Schlehofer, M., Thompson, S., Ting, S., Ostermann, S., Nierman, A., Jessica Skenderian, J., 2010 Psychological predictors of college students' cell phone use while driving, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 42, Issue 4, Pages 1107-1112,

Scialfa, C.T. et al., 2011. A hazard perception test for novice drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), pp.204–208.

Seeman P. 1999, Brain development X: pruning during development. *Am J Psychiatry*; 156: 168.

Shinar, D. y J. Stiebel. 1986. The Effectiveness of Stationary Versus Moving Police Vehicle on Compliance with Speed Limit. *Human Factors*, Vol. 28.

Shinar, D., Tractinsky, N., & Compton, R. (2005). Effects of practice, age, and task demands, on interference from a phone task while driving. *Accident Analysis and Prevention*, 37(2), 315-326. doi:10.1016/j.aap.2004.09.007

Smith, P.M. et al., 2015. The development of a conceptual model and self-reported measure of occupational health and safety vulnerability. *Accident; analysis and prevention*, 82, pp.234–43.

Strayer, D., Drews, F., Johnston, W., 2003. Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(1), 23-32.

Stutts, J.C., Reinfurt, D.W., Staplin, L., Rodgman, E.A., 2001. The role of driver distraction in traffic crashes. Report Prepared for AAA Foundation for Traffic Safety.

SWOV, 2008. Fact sheet. Use of mobile phone while driving, SWOV, Leidschendam, the Netherlands

Triggs, T.J., 1996. Driving simulation for railway crossing research, In *Seventh International Symposium on Railroad-Highway Grade Crossing Research and Safety – Getting Active at Passive Crossings*, Monash University, Clayton, Australia.

Regan, M.A., Lee, J.D., Young, K.L. (Eds.), 2008. *Driver Distraction: Theory, Effects, and Mitigation*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 31–40.

Ripley, B.D., 1996. *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press, Cambridge

Ülker, Mehmet Barış Tabakcioğlu Bursa, Turkey Hüseyin Çizmeci¹, Doruk Ayberkin, 2017 Relations of Attention and Meditation Level with Learning in Engineering Education ECAI International Conference – 9th Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence 29 June -01 July, 2017, Targoviste, ROMÂNIA

Vaa, T. 1997, Increased police enforcement> effects on speed, *Accident Analysis and Prevention*. 29(3) pp. 373-85.

Vlahogianni, E.I., Karlaftis M.G., 2010. Enhancing predictions in signalized arterials with information on short-term traffic flow dynamics. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 13 (2), 73–84

Viola, P. Jones, M. (2001) Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, (Vol 1, pp. I-511)

Waller, J.A., 1980. Physician's role in highway safety. Functional impairment in driving. *N Y State J Med* 1980; 80:1987-1991

Warner, H.W. & Åberg, L., 2012. Drivers' tendency to commit different aberrant driving behaviours in comparison with their perception of how often other drivers commit the same behaviours. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, pp.37–43.

Warner, B., Misra, M., 1996. Understanding neural networks as statistical tools. *The American Statistician* 50 (4), 284–293.

Wild, C.J., Pfannkuch, M., 1999. Statistical thinking in empirical enquiry. *International Statistical Review* 67 (3), 223–265

Winkel, H., Kim, T. H., Kardash, L., & Belic, I. (2019). Smartphone use and study behavior: A Korean and Australian comparison. *Heliyon*, 5(7), e02158.

World Health organization, WHO, Road Safety, Deaths, 2015, página web http://gamapserver.who.int/gho/interactive_charts/road_safety/road_traffic_deaths/atlas.html, recuperado 4/07/2017

Wu, X., Zhu, X., Wu, G.-Q., Ding, W., Data mining with big data, *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, Vol. 26, No 1, 2014.

Yannis G., 2013. Review of distracted driving factors, *Proceedings of the 13th World Conference on Transportation Research*, COPPE - Federal University of Rio de Janeiro at Rio de Janeiro, Brazil.

Young, K., Regan, M., Hammer, M., 2003. Driver distraction: a review of the literature, MUARC, Report No. 206 Zamith, M. et al., 2015. A new stochastic cellular automata model for traffic flow simulation with drivers' behavior prediction. *Journal of Computational Science*, 9, pp.51–56.

Zheng, F. (2011) *Modelling Urban Travel Times*. PhD Thesis, Deft University of Technology.

**Anexo A: Aval del comité de ética, Facultad
de Medicina, Universidad Nacional de
Colombia**



Comité de Ética
Facultad de Medicina
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ACTA DE EVALUACIÓN: N°. 015-257-18
Fecha: 14 de octubre de 2018

Nombre completo del proyecto: **"MODELO DE COMPORTAMIENTO DE CONDUCTORES Y LA GENERACIÓN DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO"**.

Versión: 01

Sometido por: el estudiante Wilson Arias Rojas

Dirigido por: el profesor Jorge Eliecer Córdoba Maquillón

Presentado por: el profesor Julio Esteban Colmenares Montañez, Coordinador Curricular

Departamento o Sección: Programa Doctorado de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería

Fecha en que fue sometido a consideración del Comité: 14 de octubre de 2018

EL COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE MEDICINA. Se constituyó mediante la Resolución 152, (Acta No. 43 del 5 de diciembre de 1996) actualizado mediante resolución 008 (acta 03 de 27 de enero de 2011), de Consejo de Facultad el Comité de Ética de investigación, el cual está regido por la Resolución 008430 del 4 de octubre de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia que estableció las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud; los principios de la Asamblea Médica Mundial expuestos en su Declaración de Helsinki de 1964, última revisión del año 2000; y el código de regulaciones federales, título 45, parte 46, para la protección de los sujetos humanos, del departamento de salud y servicios humanos de los Institutos Nacionales de Salud de los Estados Unidos (Junio 18 de 1991).

1. Sus miembros revisaron los siguientes documentos del presente proyecto:

- ✓ Carta de presentación del proyecto generada por la unidad básica o el departamento.
- ✓ Copia de la evaluación de los jurados o pares académicos que evaluaron y aprobaron el trabajo)
- ✓ Copia del proyecto completo de investigación.
- ✓ Dos resúmenes ejecutivos.
- ✓ Dos copias del consentimiento informado (en español y cuando la investigación lo amerite).
- ✓ Hojas de vida resumidas de los investigadores y coinvestigadores del proyecto
- ✓ Consideraciones éticas según resolución 8430 Ministerio de Salud.
- ✓ Resultados de evaluación por otros comités (si aplica)

2. El presente proyecto fue evaluado y aprobado por los siguientes miembros del Comité:

- | | | |
|---|--------------------------------|---|
| 1 | Camargo Mendoza Maryluz | Departamento de la Comunicación Humana |
| 2 | Díaz Cruz Luz Amparo | Departamento de Obstetricia y Ginecología |
| 3 | Dueñas Gómez Zulma Janeth | Departamento de Ciencias Fisiológicas |
| 4 | Guerrero Fonseca Carlos Arturo | Presidente Comité de Ética / Dpto. de Ciencias Fisiológicas |
| 5 | Parra Pineda Mario Orlando | Departamento de Obstetricia y Ginecología |

SESQUICENTENARIO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



[Página 1/1]
Elaboró Jeannette Pineda A.

Carrera 30 N°. 45-03
FACULTAD DE MEDICINA, Edificio 471 - 1 piso, Of.136
Comunicador: (57) (1) 316 5000 ext. 15167
Bogotá, Colombia
eticasalud_fmbo@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos



Comité de Ética
Facultad de
Medicina



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sede Bogotá

3. El Comité consideró que el presente estudio:

- Es válido desde el punto de vista ético. La investigación involucra un riesgo igual al promedio para los sujetos que participan en ella. La investigación se ajusta a los estándares de la buena práctica clínica.
- El Comité considera que las medidas que están siendo tomadas para proteger a los sujetos humanos son adecuadas.

4. El Comité informará inmediatamente a las directivas institucionales:

- Todo desacato de los investigadores a las solicitudes del Comité.
- Cualquier suspensión o terminación de la aprobación por parte del Comité.

5. El Comité informará inmediatamente a las directivas, toda información que reciba acerca de:

- Lesiones o daños a sujetos humanos con motivo de su participación en la investigación. Problemas imprevistos que involucren riesgos para los sujetos u otras personas.
- Cualquier cambio o modificación a este proyecto que haya sido revisado y aprobado por este comité.

6. Cuando el proyecto sea aprobado, será por un periodo de un (1) año a partir de la fecha de aprobación.

7. El investigador principal deberá:

- Informar de cualquier cambio que se proponga introducir en el proyecto. Estos cambios no podrán ejecutarse sin la aprobación previa del COMITÉ DE ÉTICA DE LA FACULTAD DE MEDICINA excepto cuando sean necesarios para minimizar o suprimir un peligro inminente o un riesgo grave para los sujetos que participan en la investigación.
- Avísar de cualquier situación imprevista que se considere implica algún signo de riesgo para los sujetos o la comunidad o el medio en el cual se lleva a cabo el estudio.
- Informar de cualquier evento adverso serio de algún paciente, comunicando la situación al secretario y al presidente del Comité de Ética, de acuerdo con la normatividad que el INVIMA ha generado a este respecto.
- Poner en conocimiento del comité toda información nueva importante respecto al estudio, que pueda afectar la relación riesgo/beneficio de los sujetos participantes.
- Comunicar cualquier decisión tomada por otros comités con respecto a la investigación que se lleva a cabo.
- Informar de la terminación prematura o suspensión del proyecto explicando las causas o razones.
- Presentar a este comité un informe cuando haya transcurrido un año, contado a partir de la aprobación del proyecto. Los proyectos con duración mayor a un año, serán reevaluados a partir del informe de avance integrado.
- Todos los proyectos deben entregar al finalizar un informe final de cierre del estudio, este cierre puede ser el informe final en formato completo o en formato de resumen de cierre de estudio, firmado por el investigador responsable del estudio.

8. Observaciones:

El comité considera que el proyecto de investigación no presenta dilemas éticos, de acuerdo a los documentos que adjuntaron en esta última presentación. Por lo tanto el Comité emite Concepto Aprobatorio.

Nombre: CARLOS ARTURO GUERRERO FONSECA
Título: PhD Doctorado en Bioquímica, MSc. en Farmacología y MSc. en Genética Humana
Cargo: Presidente Comité de Ética

[Página 2/2]
Elaboró Jeannette Pineda A.

Carrera 30 N°. 45-03
FACULTAD DE MEDICINA, Edificio 471- 1 piso, Of. 136
Conmutador: (57) (1) 316 5000 ext. 15167
Bogotá, Colombia
eticasalud_fmboq@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos



Anexo B: Formatos de Asentimientos y consentimientos informados.

Asentimiento Informado de Participación en Proyecto de Investigación

Estimado/a: _____

El ingeniero WILSON ARIAS ROJAS, Investigador Principal del Proyecto denominado “Modelo de comportamiento de conductores y la generación de accidentes de tránsito” desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, **ha informado** a través de la documentación que se adjunta:

Se realizará una prueba en un simulador de conducción para determinar el comportamiento de los conductores en condiciones controladas. La población estudiada son hombres y mujeres entre los 16 y los 90 años de edad, que tengan licencia de conducir vigente y no tengan ningún tipo de enfermedad física o desorden cognitivo.

Se va a realizar 1 prueba de 10 minutos. La información obtenida es con fines académicos, se respeta la confiabilidad de los datos.

Se establece un consentimiento informado en cual se le informa al participante del experimento la siguiente información:

- Se va a grabar un registro de sus señales biológicas (ondas eléctricas generadas por el cerebro)
- Dicha información se va a almacenar en un archivo electrónico.
- Posteriormente, se usará esta información para analizar los patrones de comportamiento durante la conducción en el simulador.
- Esta información es confidencial, con fines académicos y no afecta su salud física y mental.

En conocimiento de todo ello y de las medidas que se adoptarán para la *protección de los datos personales* de los / las participantes según la normativa vigente de la resolución 8430 de 1993.

Para que pueda participar, también conversaremos con su padre/madre/tutor, pero aunque ellos estén de acuerdo en su participación, usted puede decidir **libre y voluntariamente** si desea participar o no.

Todos los datos que se recojan en la actividad serán totalmente **anónimos y privados**. Además, los datos que entregues serán absolutamente **confidenciales** y sólo se usarán para el proyecto de investigación. El ingeniero Wilson Arias Rojas, será el encargado de cuidar y proteger los datos, y tomará todas las medidas necesarias para esto.

Además, se asegurará la **total cobertura de los costos** de la actividad, por lo que su participación no le significará gastos. Por otra parte, la participación en esta actividad **no involucra pago o beneficios en dinero o cosas materiales**. Además, le contamos que se tomarán todas las medidas que sean necesarias para garantizar su salud e integridad mientras participas de la actividad.

Si usted considera que se ha hecho algo incorrecto durante la actividad, se puede comunicar con el Dr. Jorge Eliecer Córdoba, profesor de la Universidad Nacional de Colombia, al e-mail jecordob@unal.edu.co

Si decide participar, muchas gracias!

..... C.C.

Nombre

..... C.C.

WILSON ARIAS ROJAS

Investigador Principal del Proyecto.

Fecha.....

PROTOCOLO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

El ingeniero WILSON ARIAS ROJAS, Investigador Principal del Proyecto denominado “Modelo de comportamiento de conductores y la generación de accidentes de tránsito” desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, **ha informado** a través de la documentación que se adjunta a:

..... C.C.

Se realizará una prueba en un simulador de conducción para determinar el comportamiento de los conductores en condiciones controladas. La población estudiada son hombres y mujeres entre los 16 y los 90 años de edad, que tengan licencia de conducir vigente y no tengan ningún tipo de enfermedad física o desorden cognitivo.

Se va a realizar 1 prueba de 10 minutos. La información obtenida es con fines académicos, se respeta la confidencialidad de los datos obtenidos

Se establece un consentimiento informado en cual se le informa al participante del experimento la siguiente información:

- Se va a grabar un registro de sus señales biológicas (ondas eléctricas generadas por el cerebro)
- Dicha información se va a almacenar en un archivo electrónico.
- Posteriormente, se usará esta información para analizar los patrones de comportamiento durante la conducción en el simulador.
- Esta información es confidencial, con fines académicos y no afecta su salud física y mental.

En conocimiento de todo ello y de las medidas que se adoptarán para la *protección de los datos personales* de los / las participantes según la normativa vigente de la resolución 8430 de 1993.

OTORGA su consentimiento para la participación de la actual investigación

..... C.C.

Anexo C: Listado de errores de conducción

- 000: "Aviso de errores:"
- 001: "Colisión frontal"
- 002: "Choque por alcance"
- 003: "Accidente"
- 004: "Errores al margen de la carretera"
- 005: "Hecho caso omiso de la luz roja"
- 006: "Hecho caso omiso de la luz amarilla"
- 007: "Demasiado rápido"
- 008: "Hecho caso omiso de la preferencia de paso"
- 009: "No encendido de las luces"
- 010: "Ha puesto las luces de carretera"
- 011: "No ha bajado las luces de carretera"
- 012: "No ha accionado el intermitente en el cambio de carril"
- 013: "No lleva puesto el cinturón de seguridad"
- 014: "Rebasado en el margen de la carretera"
- 015: "Atropello de animal salvaje"
- 016: "Cambio de marcha inadmisible"
- 017: "Estropeo de la caja de cambios"
- 018: "Desviación de carril demasiado grande"
- 019: "Interrupción de recorrido"
- 020: "Vuelta de campana"
- 021: "Adelantado por el lado erróneo."
- 022: "Sobrepasado el limite de velocidad"
- 023: "Ignorado la prohibición de adelantar"

- 024: "Distancia al coche que nos precede muy escasa"
- 025: "Demasiado despacio"
- 026: "Via errónea"
- 027: "Carril erróneo"
- 028: "Coche derivando"
- 029: "Coche derrapando"
- 030: "Maniobra de adelantamiento peligrosa"
- 031: "Demasiado rapido en el cruce"
- 032: "Aquaplaning"
- 033: "Derrape del coche"
- 034: "Demasiada fuerza centrífuga"
- 035: "Número elevado de revoluciones"
- 036: "Fuerte frenada innecesaria\nIntente ser más previsor// ¡Evite fuertes maniobras de frenada!"
- 037: "Motor calado "
- 038: "Derrape de ruedas"
- 039: "Ruedas bloquean"
- 040: "No quitado el freno de mano"
- 041: "No valorado, ya que frenado con la izquierda"
- 042: "¡Frenado demasiado pronto!"
- 043: "¡No reaccionado!"
- 044: "Salido de la vía"
- 045: "Puesto en peligro a los usuarios de la vía pública"
- 046: "Colocado falso intermitente en el cruce "
- 047: "Prohibido ir por arcén"
- 048: "Secuencia de cambios de marcha errónea"

- 049: "Indice de idoneidad: %2.0f%%"
- 050: "Embragado muy duro "
- 051: "Esperado demasiado"
- 052: "Elegido un hueco demasiano pequeño"
- 053: "No ha mantenido el planteamiento del ejercicio"
- 054: "Fuerza de aceleración demasiado elevada"
- 055: "Cambio de marcha demasiado despacio"
- 056: "Fuerza centrífuga en la curva demasiado escasa"
- 057: "Tiempo de reacción: %2.2f Sek."
- 058: "Distancia de detención: %3.2fm"
- 059: "La luz de carretera no usado"
- 060: "Pise el freno"
- 061: "Coloque la palanca del cambio de marchas en punto muerto"
- 062: "Section driving time: %3.0f sec."
- 063: "Section distance: %3.0fm"
- 064: "Desviación del carril Ø: %3.0f%%"
- 065: "Hecho caso omiso de la linea atravesado\nVaya usted al lado izquierdo"
- 066: "ABS activado"
- 067: "Distancia de frenada: %2.2fm"
- 068: "Consumo de combustible: %s l/100km\t\t/Litro por 100 kilómetros"
- 069: "Tiempo de conducción: &2.1fm"
- 070: "¡Hecho caso omiso a la linea atravesado!\nVaya usted al lado derecho"
- 071: "Prohibido girar"
- 072: "Distancia de frenado con ABS: %2.2fm"
- 073: "Distancia de frenado sin ABS: %2.2fm"

- 074: "Pasado por alto la señal de STOP"
- 075: "!Ha conducido en la autopista\en por dirección contraria;"
- 076: "Rozaste la acera."
- 077: "Peligro, rebasar las líneas."
- 078: "Vehículo ajeno en peligro alcance"
- 079: "Vehículo precedente en peligroso alcance"
- 080: "Tiempo de soltar el acelerador: %3.2 Seg."
- 081: "Consumo de combustible medio: %3.1l/100km"
- 082: "Meta no logrado en el tiempo adecuado (%3.1Seg.)"
- 083: "Score: %1.0f%%"
- 084: "Prohibido parar"
- 085: "Presión de frenado: %3.0f per ciento"
- 086: "Unidad de manejo: %.0f"
- 087: "Abandonado de ruta"
- 088: "Terminada de ruta"
- 089: "Errores en la ruta"
- 090: "Dado rodeos"
- 091: "Acción no permitida durante el viaje"
- 092: "Vehículo ajeno en peligroso alcance"
- 093: "Dirección prohibida, ignorado flecha de dirección"
- 094: "Dirección prohibida en calle de dirección única"
- 095: "Ha alcanzado su meta"
- 096: "Terminado escenario"
- 097: "Velocidad: %3.0f km/h"
- 098: "Rebasado la velocidad aconsejada"

- 099: "Prohibido dar marcha atrás"
- 100: "Número de revoluciones demasiado pequeño"
- 101: "Cambiado la marcha sin pisar el embrague"
- 102: "Manipulación a través de comando de tiempo real: %s"
- 103: "Fin de trayecto"
- 104: "Comienza del acontecimiento"
- 105: "Fin del acontecimiento"
- 106: "Motor sobrecalentado"
- 107: "Fallo del medidor de reacción"
- 108: "Puerta no cerrada durante el recorrido"
- 109: "No llevado al pasajero"
- 110: "Distancia con el margen de la carretera demasiado grande para subirse al coche"
- 111: "Accidente con el remolque propio"
- 112: "Alcanzado el ángulo de embrage máximo"
- 113: "Perdido el contacto con el suelo"
- 114: "Medidor de radar: usted ha conducido %2.0f km/h más rápido"
- 115: "%s"
- 116: "%s"
- 117: "%s"
- 118: "Posición no correcta de los espejos"
- 119: "Número elevado de revoluciones por cambio de marcha erróneo"
- 120: "Bajo número de revoluciones por cambio de marcha erróneo"
- 121: "Motor calado por cambio de marcha erróneo"
- 122: "No puesto la primera marcha después de aparcar"
- 123: "No puesto el freno de mano después de aparcar"

- 124: "No apagado las luces después de aparcar"
- 125: "%s"
- 126: "%s"
- 127: "%s"
- 128: "Hechado por tierra el cono"
- 129: "Average RPM: %.0f RPM"
- 130: "Shifting Operations: %.0f"
- 131: "Average speed: %.0f km/h"
- 132: "Total fuel consumption: %.1f Liter"
- 133: "Economic figure: %.2f"
- 134: "%s"
- 135: "%s"
- 136: "%s"
- 137: "Windscreen wiper not activated"
- 138: "ESC activado"
- 139: "Track deviation mean: %.2f m"
- 140: "Track deviation std. dev.: %.2f m"
- 141: "Track mean: %.2f m"
- 142: "Track std. dev.: %.2f m"
- 143: "Road left for %.1f s"
- 144: "Lane borders exceeded"
- 145: "Lane borders exceeded for %.1f s"
- 146: "Time marked"
- 147: "Track deviation: %3.0f%%"
- 148: "Track deviation mean: %.2f m"

149: "Track deviation std. dev.: %.2f m"

150: "Track mean: %.2f m"

151: "Track std. dev.: %.2f m"

152: "Wrong reaction on event"

153: "Number of stops: %.0f"

154: "Number of brakings: %.0f"

155: "Disengag

Anexo D: Análisis de información en Matlab

```
clear all

close all

Data = csvread('DatosM.txt');

Pos=find(Data(:,1)==1);

Eventos = unique(Data(:,3));

NTEventos=length(Eventos);

for i=1:length(Pos)

    ini=Pos(i);

    if i==167

        fin=length(Data(:,1));

    else

        fin=Pos(i+1)-1;

    end

    EventoSujeto=Data(ini:fin,3);

    TiempoSujeto=Data(ini:fin,2);

    for Ev=1:NTEventos

        PosEve=find(EventoSujeto==Eventos(Ev));

        if isempty(PosEve)

            Patrones(i,Ev)=0;

        else

            Patrones(i,Ev)=mean(EventoSujeto(PosEve).*TiempoSujeto(PosEve));
```



```
        end
    end
end

for j=1:167
    FileName=strcat('.\DataNeuroSky\Sujeto',num2str(j),'.mat')
    a=open(FileName)
    Concentracion(j,:)=mean(diff(a.Data))
end
umbral=1.5e-3
DescPos=find(Concentracion<=umbral)
SalidaRed(DescPos)=0
ConcPos=find(Concentracion>umbral)
SalidaRed(ConcPos)=1
SalidaRed=SalidaRed'
for i=1:30
    NormPat(:,i)=Patrones(:,i)./max(Patrones(:,i))
end
% C1=1
% for C2=2:30
% figure
% plot(NormPat(DescPos,C1),NormPat(DescPos,C2),'r*')
% hold on
% plot(NormPat(ConcPos,C1),NormPat(ConcPos,C2),'b*')
% end
```

Patrones=[NormPat SalidaRed]