



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IDENTIFICANDO FACTORES QUE AFECTAN AL USO DE LA BICICLETA
MEDIANTE INDICADORES PSICOFISIOLÓGICOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

PAULINA BEATRIZ LEIVA MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:
CRISTIAN GUEVARA CUE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANGEL JIMENEZ MOLINA
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ
RICARDO HURTUBIA GONZALEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por : ISCI, FONDECYT 119110 y
FONDECYT 1231584

SANTIAGO DE CHILE
2024

Resumen

La bicicleta juega un rol importante en la sustentabilidad y eficiencia de los sistemas de transporte. Para promover y facilitar el uso de este modo es necesario entender cuáles son los factores del entorno construido, y de contexto en general, que afectan su uso. Un desafío crucial para lograr ese objetivo es poder contar con medidas insesgadas y granulares de la percepción del nivel de servicio al andar en bicicleta, complementando medidas tradicionales como encuestas de preferencias reveladas y declaradas. Una opción para lograr esto surge de aprovechar la correlación que existe entre indicadores fisiológicos y psicológicos, debido a que ambos son regulados por el sistema nervioso autónomo. Esta tesis extiende y aplica un marco metodológico para recolectar y modelar (mediante variables latentes) información fisiológica, contextual, de emociones auto reportadas y de eventos granulares del viaje en bicicleta. El modelo resultante sirve como herramienta para evaluar el impacto de las condiciones estáticas y dinámicas del entorno en el estado psicoemocional de los ciclistas, lo que es entendido como un indicador granular e insesgado del nivel de servicio percibido por los usuarios.

La metodología se aplica a un estudio de caso en el centro de Santiago de Chile, donde 46 personas realizan un circuito predefinido en bicicleta que considera diferentes tipos de infraestructura ciclista. Cada participante lleva los siguientes instrumentos: pulsera **Biomonitor**, articulada con biosensores que captan 4 señales fisiológicas del usuario (frecuencia de latidos del corazón, variación de la frecuencia de los latidos, temperatura de la piel y actividad electrodermal); **Contextino**, que registra señales contextuales del entorno (CO₂, Brillo, Ruido, Temperatura, Humedad); y por último, una **cámara GoPro**, que registra los eventos granulares y la declaración de emociones. Observando y analizando los resultados de la experiencia, se identifica primero el impacto de los tramos predefinidos estudiando las emociones declaradas y las señales medidas. Adicionalmente, se analiza la relación entre factores de contexto utilizando modelos causales basados en variables latentes.

Los resultados del estudio de caso muestran que, a medida que van cambiando los tipos de infraestructura por las que transita el participante, las variables observadas van presentando diferencias significativas entre aquellos tramos con distintos niveles de servicio. Por otra parte, a partir del modelo causal se obtiene que el género, la experiencia en bicicleta, la frecuencia de uso de este modo y el tiempo de viaje son variables que influyen notoriamente en la utilidad experimentada por el ciclista, tanto positiva como negativamente. La metodología y el estudio de caso desarrollados contribuyen a comprender mejor los determinantes de la experiencia en bicicleta, y a proporcionar información valiosa para la planificación urbana y el diseño de políticas públicas orientadas a fomentar la movilidad sostenible en entornos amigables con los ciudadanos.

A mi cuchita.

Agradecimientos

A mi familia, Sergio, Vicente, Esperanza, Luz María, Héctor, Victoria, Pepa, Coca y Canela, por acompañarme y motivarme siempre que pudieron. A Ignacio, que me dio un apoyo incondicional y sincero durante toda mi carrera universitaria, que supo quererme y respetarme de una manera muy linda y que siempre recordaré con mucho amor.

A mis amigas, Josefina, Fernanda, Constanza, Catalina, Camila, Catalina, Noelia, Sofía, Katalina y Catalina, que han sido un apoyo incondicional y mi espacio seguro por muchos años, lo que agradezco profundamente. A Paulo, simplemente por ser él y estar para mí cuando lo necesito o cuando se puede jajaja. A Camila, Amanda, Rafaella, Francisca, Elisa, Valentina, Daniela, Petra, Constanza, Catalina, Camila, Elisa, Catalina, Constanza, Daniela, Fernanda, Isidora, Javiera y Sofía, mis amigas de la universidad que fueron una compañía muy linda y supieron alegrarme cuando lo necesité.

A Camila Lira y Francisca Inostroza, que agradezco a la vida haber coincidido con ustedes y poder enamorarnos juntas de esta área tan bonita de la ingeniería, por el apañe que nos dimos en esta intensa etapa y demostrarnos que somos capaces de mucho. A Leandro, Max, Félix, Diego y Matías, mis amigos de transporte con los que pude compartir muy buenos momentos estos últimos años.

Al profesor Ángel Guevara, por su dedicación y compromiso como mi profesor guía, por motivarme a sacar lo mejor de mí y explorar en mis capacidades. Por proponerme este tema tan interesante y acompañarme en todo este proceso. Por ser una persona inspiradora que ama lo que hace y lo contagia a los demás. Al profesor Ángel Jimenez, por su entrega en el proyecto, sus comentarios de ayuda y su compromiso y preocupación por esta tesis.

A todos los que conocí en este proyecto y me ayudaron, aconsejaron y apoyaron desinteresadamente, en especial a Bastián Henríquez, Maximiliano Rosadio y Leandro Gayozo, que sin ustedes el camino habría sido mucho más difícil. Infinitas gracias.

Al Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) y al financiamiento FONDECYT 1231584.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Pregunta de investigación	3
1.4. Resumen metodológico	3
1.5. Estructura de la tesis	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Elecciones discretas	5
2.2. Indicadores psicofisiológicos	7
2.3. Preferencias ciclistas	8
2.4. Variables latentes	10
3. Estudio observacional	14
3.1. Participantes	14
3.2. Dispositivos	17
3.2.1. Biomonitor	17
3.2.2. Contexto ambiental	18
3.2.3. Raspberry Pi	19
3.2.4. Geoposicionamiento	19

3.2.5.	Contexto visual	20
3.2.6.	Autorreporte de emociones	21
3.3.	Procedimiento experimental	22
3.3.1.	Antes de la experiencia	22
3.3.2.	Durante la experiencia	23
3.3.3.	Después de la experiencia	23
3.4.	Bases de datos	23
3.4.1.	Almacenamiento de datos	24
3.4.2.	Preprocesamiento de datos	25
3.4.3.	Confección base de datos final	26
3.5.	Ruta seleccionada	31
3.5.1.	Descripción de la ruta	32
3.5.2.	Clasificación de la ruta	37
3.5.3.	Hipótesis	41
3.5.4.	Estadística descriptiva de emociones declaradas	42
4.	Análisis de resultados	46
4.1.	Detección de diferencias significativas entre los tramos de interés	46
4.1.1.	Test de varianza ANOVA	47
4.2.	Modelo causal	50
4.2.1.	Marco Conceptual	50
4.2.2.	Modelación	52
4.2.3.	Resultados Modelación en R	53
4.2.4.	Discusiones Modelación	65
5.	Conclusión	66
	Bibliografía	70

Índice de Tablas

3.1. Formato Base de Datos	27
3.2. Ejemplo Base de datos	29
3.3. Cantidad de observaciones por participante	30
3.4. Continuación Cantidad de observaciones por participante	31
3.5. Clasificaciones de infraestructura ciclista	38
4.1. Resultados Modelo 1	56
4.2. Resultados Modelo 2, Especificación 1	60
4.3. Resultados Modelo 2, Especificación 1 (Continuación)	61
4.4. Resultados Modelo 2, Especificación 2	62
4.5. Resultados Modelo 2, Especificación 3	64

Índice de Ilustraciones

2.1.	11
3.1. Ocupación principal del participante	15
3.2. Institución a la que pertenece el estudiantes	15
3.3. Biomonitor	17
3.4. Contextino	18
3.5. Conexión Raspberry Pi - Contextino	19
3.6. Ruta predefinida	20
3.7. Cámara GoPro	20
3.8. Modelo circuplejo de emociones adaptado por Barría	21
3.9. Disposición Carpeta Google Drive por participante	25
3.10. Ejemplo generación de base de datos	28
3.11. Ruta predefinida	32
3.12. Tramo 1	33
3.13. Tramo 2	33
3.14. Tramo 3	34
3.15. Tramo 3	34
3.16. Tramo 4	35
3.17. Tramo 5	35
3.18. Tramo 6	36
3.19. Tramo 7	36

3.20. Tramo 7	36
3.21. Tramo 8	37
3.22. Sin infraestructura ciclista (a)	39
3.23. Ciclovía marcada con una línea (b)	39
3.24. Ciclovía marcada con su superficie pintada (c)	40
3.25. Ciclovía marcada con una línea y separadores físicos (d)	40
3.26. Ciclovía al nivel de la vereda (e)	41
3.27. Distribución de emociones por tramo	43
3.28. Distribución Valencia	45
3.29. Distribución Activación	45
4.1. Comportamiento señales Participante 15	46
4.2. Resultados test ANOVA	48
4.3. Resultados test ANOVA (continuación)	49
4.4. Marco Conceptual	52
4.5. Marco Conceptual modelo 1	54
4.6. Marco Conceptual Modelo 2	58
5.1. Marco conceptual Modelo futuro	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La integración de la bicicleta como un componente vital en los sistemas de transporte urbano representa una estrategia clave para lograr la sostenibilidad en las ciudades modernas. Esta investigación surge de la necesidad de profundizar en la comprensión de cómo el diseño y las características del entorno urbano influyen en la elección de la bicicleta como medio de transporte. Un ejemplo de esto, es que en algunos casos existen ciclovías que no están conectadas entre comunas continuas, lo que puede generar un impacto negativo en cómo se evalúa la red de ciclovías entre un par OD en específico. Este impacto puede ser medido con la herramienta a probar en la presente investigación, mencionada anteriormente. Frente a las limitaciones de las técnicas de medición convencionales, como las encuestas y los estudios de preferencias, emerge la necesidad de adoptar un enfoque más holístico y preciso para evaluar la experiencia ciclista.

Esta tesis se enfoca en establecer una correlación entre las respuestas fisiológicas y emocionales de los ciclistas y las características específicas del recorrido (que se llamarán eventos granulares). A través de este enfoque, buscamos obtener una comprensión más profunda de cómo los diferentes aspectos del entorno urbano, tanto estáticos como dinámicos, afectan el bienestar emocional y físico de los ciclistas.

La integración de los indicadores psicofisiológicos en la planificación del transporte permite desarrollar sistemas más adaptados a las necesidades y reacciones emocionales de los usuarios. Esta información es fundamental para diseñar rutas más eficientes, mejorar la seguridad y comodidad de los medios de transporte y, por consiguiente, aumentar la satisfacción del usuario y promover prácticas de transporte más sostenibles.

Se recurre al concepto de Variables Latentes (en adelante VL), que representan constructos teóricos o conceptos abstractos, como las habilidades, actitudes o estados emocionales. Se reconoce que el estado emocional y psicológico de una persona es complejo y no puede ser medido directamente, pero se puede inferir a través de otras variables que sí se observan. Las VL permiten inferir y representar estos estados internos a partir de indicadores observables y medibles, por ejemplo, el tiempo de viaje, nivel de hacinamiento, costo de viaje, entre otros.

En este marco, se introduce la idea de la ‘Utilidad Instantánea’ (UI) para capturar la experiencia del ciclista en tiempo real, dada cierta elección que está influenciada por una variedad de factores tanto observables como no observables. En este estudio, se analiza la UI en cada instante ‘t’ que sea de interés para la investigación. Al finalizar, se presenta un modelo causal de VL, basado en ecuaciones estructurales y de medición que incorpora los datos recolectados en el estudio de caso realizado para esta investigación. Este modelo está basado en el enfoque propuesto por Castro et al. (2020).

El objetivo de este trabajo es desarrollar y validar a nivel prototipo, una metodología de recolección de datos y una modelación de relaciones causales entre atributos de la experiencia de viaje en bicicleta e indicadores psicofisiológicos del usuario. También, proporcionar una base de conocimientos más integrada y detallada para los planificadores urbanos y responsables de políticas públicas. Es decir, se espera que los hallazgos de esta investigación contribuyan positivamente a la creación de entornos urbanos más amigables para los ciclistas, para seguir construyendo el camino hacia un Chile sustentable. Se busca entregar opciones atractivas a los ciudadanos para elegir un ambiente más saludable, responsable y eficiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar, probar y establecer una metodología que relacione indicadores fisiológicos y emociones de un usuario con las características del viaje en bicicleta. Además, modelar las relaciones causales entre atributos de la experiencia en bicicleta e indicadores psicofisiológicos del usuario, a través de un modelo de variables latentes.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Revisar críticamente la bibliografía existente relacionada a las emociones e indicadores psicofisiológicos en distintas actividades. También, revisar la literatura relativa a la infraestructura ciclista y sus impactos en los usuarios del espacio público.
2. Diseñar y aplicar un estudio de caso observacional en bicicleta que permita validar la metodología propuesta.
3. Caracterizar tramos de ciclovías del estudio de caso según sus niveles de servicio.
4. Formular y estimar un modelo de variables latentes que establezca una relación causal entre las emociones de las personas en el estudio de caso, con el contexto que enfrentaron.

1.3. Pregunta de investigación

¿Cómo influyen las condiciones de infraestructura ciclista en el estado emocional y fisiológico de los usuarios?

1.4. Resumen metodológico

Para lograr el cometido de la presente investigación, se define una metodología de trabajo que permite detectar y analizar las percepciones de un usuario en bicicleta con respecto a distintas variables evaluadas. A partir de los resultados obtenidos, es posible estimar un modelo de variables latentes que estima la utilidad instantánea experimentada por el usuario, incorporando las variables observadas durante el estudio. A continuación, se detallan los pasos principales de este trabajo:

1. Investigación: Se revisa la literatura existente sobre modelos de elección, indicadores psicofisiológicos, preferencias ciclistas y variables latentes, para reconocer aquellos puntos en los que ya se ha indagado como los que no.
2. Reconocimiento de datos disponibles: Se recoleta y revisa detalladamente la información disponible correspondiente a la fase Piloto del proyecto, realizada en septiembre de 2022.
3. Diseño e Implementación del estudio: Una vez que se identifican las ventajas y desventajas de la experiencia Piloto, se desarrolla la versión definitiva del experimento. Se realizan encuestas sociodemográficas, de salud física y mental a los inscritos, para obtener una representación detallada de cada uno de los participantes. Luego, se lleva a cabo el proceso de toma de datos en junio de 2023, materializándolo en un estudio de caso aplicado en Santiago de Chile, donde 46 personas andan en bicicleta por el mismo circuito predefinido que en la experiencia Piloto, que considera diferentes tipos de infraestructura. El propósito es evidenciar cuáles son los tipos de ciclovías y condiciones del espacio que gatillan percepciones más positivas y negativas en los usuarios, lo que permite sugerir posibles mejoras en políticas públicas.
4. Análisis de datos: Una vez que se procesan los datos, es posible realizar un análisis de las variables observadas durante las experiencias. Estas son: señales del entorno, señales fisiológicas del usuario, emociones reportadas por el usuario, características de la infraestructura ciclista y eventos granulares del viaje. Se validan las hipótesis propuestas inicialmente.
5. Modelación: Luego de corroborar teóricamente las hipótesis, se realiza un proceso de validación utilizando datos empíricos. Se estima un modelo de variables latentes, donde la variable a estimar es la Utilidad Instantánea (UI). Para esto, se toma la estructura del marco metodológico propuesto por Castro et al. (2020) para la incorporación de indicadores psicofisiológicos en modelos de elección de transporte, los cuales se miden con biosensores articulados en la pulsera Biomonitor, que debe llevar el ciclista en su muñeca. El objetivo es explorar distintas variables del entorno ciclista que afectan directamente en el estado afectivo de los usuarios, basándose en las señales psicofisiológicas.

1.5. Estructura de la tesis

Buscando que la lectura del presente trabajo sea más amena, se presenta un resumen de la estructura de la tesis:

Capítulo 2: Marco Teórico. Se presenta la revisión bibliográfica realizada en relación con los modelos de elección discreta, específicamente los de variables latentes. Se explora el estado del arte en cuanto al modo Bicicleta y al uso de los indicadores psicofisiológicos en transporte.

Capítulo 3: Estudio observacional. Se da a conocer en detalle el protocolo experimental utilizado para llevar a cabo el experimento. Además, se detalla el proceso por el que pasan los datos para obtener la base de datos final con la que se estiman los modelos. Finalmente, se presenta la ruta seleccionada junto a distintas clasificaciones aplicadas.

Capítulo 4: Análisis de resultados. Se detallan los resultados obtenidos en cuanto a cumplimiento de hipótesis sobre las diferencias experimentadas a nivel de las señales fisiológicas al cambiar las condiciones de infraestructura a lo largo del viaje, como también los resultados del modelo causal basado en variables latentes.

Capítulo 5: Conclusiones. Se dan a conocer las conclusiones más relevantes del estudio, dando un cierre al documento respondiendo las preguntas iniciales. Por otra parte, se mencionan los aportes al área de transporte, es decir, el impacto en políticas públicas, y finalmente, se recomiendan posibles extensiones a futuro de la línea de investigación.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Elecciones discretas

Los modelos de elección en el ámbito del transporte son un mecanismo que se utiliza para comprender y anticipar el comportamiento de los usuarios en cualquier sistema de movilidad de la manera más precisa posible. Dichos modelos representan una herramienta clave para comprender las decisiones de los individuos en relación con el transporte. Esto último, es un punto de alta complejidad, ya que históricamente se ha requerido acceder a este tipo de información, pero no es un proceso trivial ni directo.

Estos modelos permiten evaluar con precisión el impacto de las distintas variables que afectan en la experiencia de viaje de los usuarios, y que posteriormente resultan en la toma de decisiones. Estas decisiones son conocidas como Elección, las cuales están basadas tanto en las variables mencionadas, como también en la costumbre, conocimiento, etc.

Los modelos Logit multinomial son usados para estimar el impacto de cada variable en la Utilidad de un individuo:

$$U_{in} = \beta X_{in} + \varepsilon_{in} \quad (2.1)$$

El primer término representa la parte determinística de la Utilidad, también denotado como V_{in} y el segundo, la parte aleatoria. Donde n representa la elección e i al individuo. X_{in} representa un set de variables explicativas específicas de la elección n , para el individuo i . ε_{in} es el término aleatorio del error, que se asume independiente e idénticamente distribuida Gumbel (McFadden, 1972).

La probabilidad de que el individuo i elija la opción n se modela utilizando la función logit multinomial:

$$P(Y_{in} = n) = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{ij}}} \quad (2.2)$$

Donde, Y_{in} es la elección del individuo i en el escenario n . J es el número total de opciones. Este modelo se ajusta utilizando datos observados, y los coeficientes β se estiman maximizando la función de verosimilitud, asumiendo que los términos del error ε siguen una distribución Gumbel. El modelo logit multinomial es ampliamente utilizado en la modelización de elecciones discretas, como la elección de productos, servicios o destinos. El método de distribución Gumbel se elige a menudo para capturar la variabilidad no observada y aleatoria en la toma de decisiones.

Los procesos de toma de decisiones pueden ser para un conjunto discreto como uno continuo, como por ejemplo elegir el modo de transporte o elegir la ruta para ir de un punto a otro, en el caso de las elecciones discretas, o elegir la velocidad de viaje, en el caso de las elecciones continuas. En este proceso, es necesario incorporar a la ecuación aquellos elementos que influyen en la decisión, como los costos de viaje, tiempo de viaje, sensación de seguridad, comodidad, preferencias individuales y factores socioeconómicos. Es importante estudiar esto porque guarda relación directa con la planificación óptima y eficiente del transporte.

La manera tradicional de acceder a este tipo de información es con encuestas de preferencias declaradas o reveladas, las cuales consisten en exponer al individuo a diversas situaciones hipotéticas o reales respectivamente, en las que tienen que realizar una elección teniendo en cuenta las variables y restricciones del escenario en cuestión. El problema, es que estas metodologías están sujetas a un sesgo, ya sea por falta de información, por infravaloración de los atributos del viaje, costumbres, entre otras.

Por lo anterior, en la literatura se encuentran trabajos exhaustivos, que buscan encontrar un camino que sea más confiable para recolectar información sobre el comportamiento de los usuarios, y pueda complementar las medidas tradicionales descritas anteriormente. Uno de estos caminos, es aquel que tiene como base la intersección que existe entre las decisiones que toman las personas y lo que sucede en su cuerpo a nivel físico como psicológico al momento de hacerlo.

En Castro et al. (2020) se presenta un marco metodológico, que incorpora indicadores psicofisiológicos recopilados por biosensores en modelos de comportamiento en elecciones de transporte. En dicho estudio, se presenta un Marco conceptual que explica la relación causal entre todas las variables que se quieren estudiar para llevar a cabo esta incorporación de indicadores al problema.

El marco conceptual canónico para la modelación discreta de emociones, consiste en que el individuo escoge cierta alternativa con atributos y características como datos observados, que junto a ciertas perturbaciones exógenas conforman la variable latente Utilidad indirecta. Luego, basándose en que las personas son seres racionales, se dice que el individuo escoge aquella combinación que maximiza su utilidad, traducándose en la elección observada. Es importante notar que, cuando se habla de perturbaciones exógenas, se hace referencia a la parte aleatoria de la utilidad, que supone la omisión de atributos no observados, los que se asumen como independientes de los atributos. En este estudio, algunos atributos no observados son llamados eventos granulares específicos de cada experiencia, que pueden corresponder a distintas anomalías propias del viaje dinámico.

Entonces, el enfoque comentado anteriormente propone que, mediante biosensores, es posible

recopilar indicadores psicofisiológicos que están directamente relacionados con los estados y emociones psicofisiológicos (PPSE) que percibe un usuario de algún sistema de transporte.

Al día de hoy, se ha trabajado para desarrollar un sistema de medición poco invasivo que sea capaz de recopilar la información que se necesita. La ventaja de esto, es que estas señales que se desprenden son involuntarias, lo que es una ganancia con respecto al sesgo generado con las medidas tradicionales de percepciones durante el viaje. En estudios anteriores ya se ha usado la actividad electrodermal de la piel para medir el estrés durante la realización de ciertas actividades. (Setz et al., 2009)

2.2. Indicadores psicofisiológicos

Los indicadores psicofisiológicos son medidas objetivas que reflejan tanto procesos fisiológicos como psicológicos de un individuo. Estas medidas son respuestas del cuerpo que pueden medirse objetivamente y que están asociadas a estados emocionales, cognitivos, psicológicos y fisiológicos.

Existe una rama de la literatura que explora el uso de estos indicadores para entender el comportamiento y las preferencias de las personas ante a diversos estímulos, donde se estudia la interacción entre la mente y el cuerpo. Algunas disciplinas que abordan este enfoque son: Neurociencia del consumidor, Neuromarketing, Estudios de respuesta cerebral, Psicología del estrés, Investigación sobre preferencias alimentarias y Psicofisiología emocional. Esta última, investiga cómo las respuestas fisiológicas del cuerpo están relacionadas con las emociones y cómo estas respuestas pueden influir en el comportamiento de las personas. Estas mediciones proporcionan datos objetivos sobre el estado psicofisiológico del usuario en tiempo real.

Diversos estudios han encontrado una asociación definitiva entre ciertas emociones humanas y respuestas fisiológicas como el ritmo cardíaco, la conductancia de la piel, presión arterial, tasa de respiración, entre otras (Boucsein, 2012).

La medición de estos indicadores fisiológicos se realiza a través de tecnologías avanzadas con biosensores portátiles. Estos dispositivos pueden registrar la actividad electrodermal, que refleja la activación del sistema nervioso simpático, la frecuencia cardíaca y su variabilidad, que se relacionan con el estrés, la temperatura de la piel y otros indicadores fisiológicos. Las situaciones de estrés pueden afectar no sólo en aspectos emocionales y cognitivos, sino también pueden desencadenar cambios biológicos significativos que impactan la salud física, evidenciando una profunda conexión entre la mente y el cuerpo en respuesta al estrés (Ulrich-Lai and Herman, 2009).

El estrés es una reacción desde un estado de calma hacia un estado de excitación, evidenciando un estado de alerta durante una situación en que el sujeto se siente amenazado o atacado. Así, los eventos estresantes causan cambios dinámicos en el Sistema Nervioso Autónomo (SNA); específicamente, los eventos estresantes provocan un aumento en la actividad del Sistema Nervioso Simpático (SNS) (Jänig and McLachlan, 1992) y una disminución en la actividad del Sistema Nervioso Parasimpático (SNP), lo cual se evidencia por cambios en la frecuencia cardíaca, la presión arterial, la frecuencia respiratoria y la respuesta galvánica de

la piel (GSR) (Sharma and Gedeon, 2012). En adelante, GSR también es nombrada como EDA (Electrodermal Activity).

En los estudios revisados, se observa un aumento en la frecuencia cardíaca al experimentar emociones negativas (como la ira, ansiedad, vergüenza, miedo, tristeza) y positivas (como la felicidad, alegría, placer), así como también en la sorpresa. La frecuencia cardíaca disminuye ante aquellas emociones que incluyen un elemento de pasividad, como el miedo a una amenaza, la tristeza sin llanto, el afecto, la satisfacción, etc. (Kreibig, 2010). Luego, la temperatura de la piel responde linealmente a la contracción y relajación de los músculos lisos que rodean los vasos sanguíneos (Barría, 2020) y se ha encontrado que un aumento en la temperatura de la piel puede ser explicado por las emociones de sorpresa e ira, mientras que una disminución de ésta se ve explicada por el miedo, la tristeza y el disgusto (Collet et al., 1997).

En el contexto del transporte, los indicadores psicofisiológicos ofrecen una perspectiva profunda sobre cómo los usuarios interactúan con los sistemas de transporte y cómo responden a ellos. Es crucial comprender cómo los usuarios perciben y reaccionan a diferentes aspectos de su experiencia de viaje, apuntando a la integración de este enfoque en la planificación y diseño del transporte, que sería un paso adelante hacia la creación de sistemas centrados en el usuario, que sean seguros y eficientes.

En Barría (2020), se diseña y ejecuta un experimento que permite registrar emociones con información granular, contribuyendo al desarrollo de herramientas que permitan representar las bases del comportamiento que están detrás de los modelos de elección en transporte. Este estudio pertenece al proyecto Biomonitor, del cual también es parte el presente estudio.

A pesar de su potencial, el uso de indicadores psicofisiológicos enfrenta desafíos como la interpretación de los datos, la variabilidad individual en las respuestas y la intrusividad de los métodos de medición. Sin embargo, con el avance de la tecnología y la mejora en los métodos de análisis de datos, se espera que estos indicadores jueguen un papel cada vez más importante en el estudio del comportamiento en el transporte.

2.3. Preferencias ciclistas

La infraestructura ciclista, más que un conjunto de trayectos y señalizaciones, representa un entorno complejo donde se manifiestan las interacciones entre el ciclista y el espacio urbano. La selección de rutas, lejos de ser un acto trivial, encierra una serie de consideraciones que van desde la seguridad percibida hasta la eficiencia del trayecto. La elección de una vía específica, por tanto, es el resultado de la evaluación de estos factores y su impacto en la experiencia del viaje. En este sentido, las preferencias ciclistas varían significativamente, reflejando la diversidad de necesidades y expectativas. Existen distintos enfoques para abordar las preferencias ciclistas, pero la conclusión principal encontrada en la literatura es que uno de los puntos más relevantes que se debe tener en cuenta, es qué tan seguros se sienten los ciclistas mientras andan en bicicleta, ya que generalmente aquel ciclista que se siente seguro en su viaje, tiende a viajar más en bicicleta. (Emond et al., 2009; Majumdar et al., 2015)

La literatura revisada sugiere que las infraestructuras de alto estándar, como los carriles

bici segregados, no solo aumentan la seguridad objetiva y subjetivamente, sino que también promueven una mayor inclusión, animando a un espectro más amplio de la población a optar por la bicicleta como su modo de transporte habitual. Además, la continuidad y conectividad de estas infraestructuras se presentan como elementos críticos, al influir directamente en la eficacia y atractivo del ciclismo urbano. Caulfield et al. (2012) definen lo anterior como 'rutas amigables con la bicicleta', que son aquellas que se consideran seguras, directas, coherentes, atractivas y cómodas.

Para una aproximación integral, se debe considerar que las decisiones de los ciclistas no se toman en el vacío, sino que están influenciadas por la interacción dinámica de múltiples variables. Estas incluyen, factores personales, ambientales, sociales y económicos. Por lo tanto, un enfoque holístico para el diseño de la infraestructura ciclista no solo debe atender a la funcionalidad de las rutas, sino también a cómo estas se integran en la vida cotidiana de los usuarios, como también en la vida cotidiana de los no usuarios. El ciclismo tiene el potencial de aliviar los sistemas de transporte sobrecargados, especialmente para los viajes más cortos. (Sun and Zacharias, 2017).

Basándose en lo anterior, se realiza una búsqueda de clasificaciones de infraestructura utilizadas en los estudios de los últimos años. Existen varios tipos de ciclovías, cada una diseñada para adaptarse a diferentes entornos y necesidades:

1. Ciclovía segregada: Vía exclusiva para bicicletas que está físicamente separada del tráfico motorizado y de peatones.
2. Ciclocarril o ciclobanda: Es una parte de la acera destinada y señalizada para el uso exclusivo de ciclistas pero no está separada físicamente del tráfico. Generalmente se marca con una línea pintada.
3. Ciclopista o senda ciclable: Es un camino exclusivo para bicicletas que está completamente separada de las vías para vehículos motorizados. Suele encontrarse en parques, zonas rurales o a lo largo de ríos. (ej: ciclovía al costado del Río Mapocho o ciclovía de calle Pocuro).
4. Ciclovía en acera: Vía designada para las bicicletas que está en la acera, es decir, al nivel del tránsito peatonal pero separado de éste.

Las clasificaciones encontradas se centran en el diseño de las ciclovías, comparando los tipos de vía existentes para uso en bicicleta. Los criterios de clasificación más comunes son los siguientes:

- a) Ciclovía con segregación física (separadores)
- b) Ciclovía con segregación visual (líneas pintadas)
- c) Ciclovía al nivel de la calzada
- d) Ciclovía al nivel de la acera

- e) Ciclovía unidireccional
- f) Ciclovía bidireccional
- g) Ciclovía compartida con carril bus
- h) Parques o calles residenciales y calmadas
- i) Sin infraestructura ciclista

(Caulfield et al., 2012; Rossetti et al., 2018, 2019; Teixeira et al., 2020; Márquez and Soto, 2021).

La calidad de la experiencia ciclista está intrínsecamente ligada a la calidad de la infraestructura utilizada. Un diseño que comprenda y responda a las preferencias de los ciclistas puede servir como catalizador para una transición hacia prácticas de movilidad más sostenibles y saludables. Consecuentemente, la incorporación de una infraestructura ciclista bien planificada es un componente esencial en la promoción de un transporte urbano equitativo y eficiente.

2.4. Variables latentes

Las variables latentes son constructos teóricos que representan dimensiones no observables que influyen en la toma de decisiones. Este enfoque permite abordar el impacto que tienen los aspectos emocionales y fisiológicos, por ejemplo, en la elección de un modo de transporte.

Existen distintas técnicas para la modelación estadística de variables latentes, como los modelos de ecuaciones estructurales y de medición, los que permiten una representación precisa de como las variables latentes interactúan con las variables observadas y cómo contribuyen a la experiencia

En el estudio de modelos de elección, las variables latentes son vitales para capturar la ‘Utilidad Indirecta’ asociada con elecciones específicas. Esta utilidad se ve afectada por factores no observados, como preferencias personales, experiencias previas y emociones experimentadas durante el viaje, que son cruciales en el contexto de la experiencia de viaje. Los argumentos de racionalidad detrás de los modelos canónicos de elección (McFadden, 1972; Walker and Ben-Akiva, 2002), pueden relajarse al introducir la idea de Utilidad Experimentada e Instantánea propuestas por Kahneman et al. (1997), ya que incorporando el concepto de utilidad recordada y utilidad de decisión, las utilidades pueden diferir de lo que se esperaba antes de realizar la elección (Henríquez-Jara et al., 2023).

El siguiente diagrama resume la estructura del modelo que incluye variables latentes en el marco conceptual.

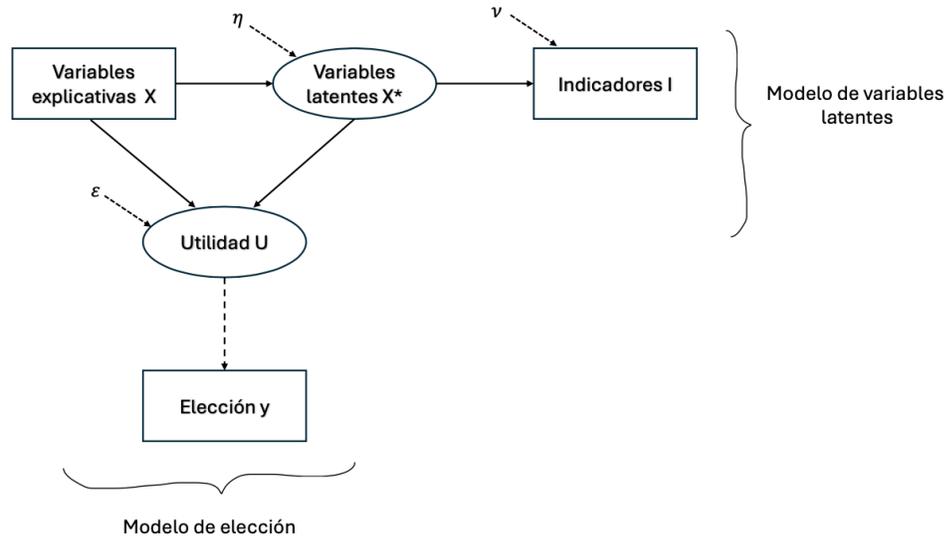


Figura 2.1:

Integrated Choice and Latent Variable Model - ICLV Model (Walker and Ben-Akiva, 2002)

En este estudio, las variables latentes, específicamente la ‘Utilidad Instantánea’, se introducen para explorar cómo los atributos de la infraestructura ciclista influyen en el estado emocional y fisiológico de las personas durante el viaje en bicicleta. Estas variables permiten ir más allá de las medidas tradicionales y capturan dimensiones más profundas de la experiencia del ciclista.

La inclusión de variables latentes mejora la capacidad para comprender y explicar la complejidad de la experiencia ciclista. Estas variables enriquecen la interpretación de los datos, proporcionando insights más allá de las mediciones tradicionales y facilitando la identificación de áreas específicas para mejoras en políticas públicas.

Trabajar con variables latentes presenta desafíos, incluyendo la identificabilidad y la interpretación de los resultados. Sin embargo, las contribuciones potenciales de estas variables superan estos desafíos, proporcionando una comprensión más profunda de la experiencia ciclista. En Henríquez-Jara et al. (2023), se encuentra que la implementación del marco del Modelo integrado de Elección y de Variables Latentes (ICLV, por sus siglas en inglés) resulta en mejoras en el ajuste a los datos, en comparación con los modelos de elección que no incluyen variables latentes.

Matemáticamente, los modelos ICLV consisten en dos componentes: un DCM (Discrete Choice Model) y un SEM (Structural Equations Model):

$$u_n = Bx_n + \Gamma x_n^* + \varepsilon_n \quad (2.3)$$

$$x_n^* = Ax_n + v_n \quad (2.4)$$

$$i_n^* = Dx_n^* + \nu_n \quad (2.5)$$

$$y_{nj} = \begin{cases} 1 & \text{si } u_{nj} \geq u_{nj0} \text{ para } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.6)$$

La ecuación 2.3 es la ecuación estructural del DCM. u_n es el vector ($J \times 1$) que contiene las J utilidades de las alternativas enfrentadas por cada individuo n ($n \in 1, \dots, N$). Las alternativas están descritas por K variables explicativas observables en el vector ($K \times 1$) x_n . Las M variables explicativas latentes están en el vector ($M \times 1$) x_n^* . B es la matriz ($J \times K$) con los coeficientes de las variables observables. Algunos términos pueden ser iguales a cero si el conjunto de variables observables x_n no es el mismo en la Ecuación 2.3 y en la Ecuación 2.4. Γ es la matriz ($J \times M$) con los coeficientes de las variables latentes. ε_n representa el vector ($J \times 1$) compuesto por términos del error.

La ecuación 2.4 es la ecuación estructural del SEM. A es la matriz ($M \times K$) con los coeficientes que denotan los efectos de las variables observables en las variables latentes. Algunos términos pueden ser iguales a cero si el conjunto de variables observables x_n es diferente en la Ecuación 2.3 y la Ecuación 2.4. v_n es el vector ($M \times 1$) compuesto por términos del error distribuidos normalmente e independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.) con ϕ la matriz de covarianza.

La ecuación 2.5 es la ecuación de medición del SEM. i_n^* es el vector ($R \times 1$) de indicadores utilizados para medir las variables latentes. Se asume que son continuos y distribuidos normalmente. D es una matriz ($R \times M$) con los coeficientes asociados con las variables latentes. η_n es el vector ($R \times 1$) compuesto por términos de error distribuidos normalmente e independientes e idénticamente distribuidos con Φ la matriz de covarianza. Los términos de error ε_n , v_n y η_n se consideran mutuamente independientes.

La Ecuación 2.6 es la ecuación de medición de la parte de elección discreta del modelo. y_{nj} es el indicador de elección, que es igual a uno si se elige la alternativa j y 0 en otro caso.

A veces, el modelo se escribe en su forma reducida, integrando la Ecuación 2.4 en la Ecuación 2.3:

$$\begin{aligned} u_n &= Bx_n + \Gamma(Ax_n + v_n) + \varepsilon_n \\ &= (B + \Gamma A)x_n + \Gamma v_n + \varepsilon_n \end{aligned} \quad (2.7)$$

La densidad conjunta de y_n e i_n es:

$$f_{y,i} = \int_{x^*} f_y(y_n | x_n, x_n^*; B, \Gamma) f_i(i_n^* | x_n^*; D, \Phi) f_{x^*}(x_n^* | x_n; A, \Phi) dx^* \quad (2.8)$$

Las expresiones de las funciones de densidad f_y , f_i y f_{x^*} dependen de las hipótesis realizadas sobre los términos de error asociados ε_n , v_n y η_n (Bouscasse, 2018).

La aplicación de variables latentes en el estudio de la experiencia ciclista enriquece la investigación, permitiendo una comprensión más completa y detallada de los factores que influyen en la elección de la bicicleta como medio de transporte. Estas variables son fundamentales para responder a la pregunta central de esta investigación sobre cómo los atributos de la infraestructura ciclista afectan el estado emocional y fisiológico de las personas.

Capítulo 3

Estudio observacional

El estudio consiste en instrumentar a un grupo de ciclistas con sensores de señales fisiológicas y del entorno, capturando esta información mientras recorren un circuito predefinido en bicicleta. El objetivo es obtener información de cómo inciden las características del viaje en la percepción del usuario, utilizando información psicofisiológica de éste. Para llevar a cabo el estudio, se diseña y aplica una metodología detallada que debe seguir el grupo de participantes seleccionados.

3.1. Participantes

Se invita a participar en el estudio a cualquier persona que así lo prefiera, realizando un llamado abierto por las páginas de la facultad, en u-Cursos e Instagram, ofreciendo un incentivo de \$15.000 pesos chilenos.

Se obtiene una muestra total de 46 participantes, con una media de edad de 27,8 años y desviación estándar 7,6 años. Por otro lado, el 33% declara representarse por el género femenino y un 67% por el género masculino. De los 46 participantes inscritos, 36 son estudiantes, 8 personas que trabajan y 2 declaran 'Otro' como su ocupación principal. En esta oportunidad no se inscriben funcionarios ni académicos de la Facultad.

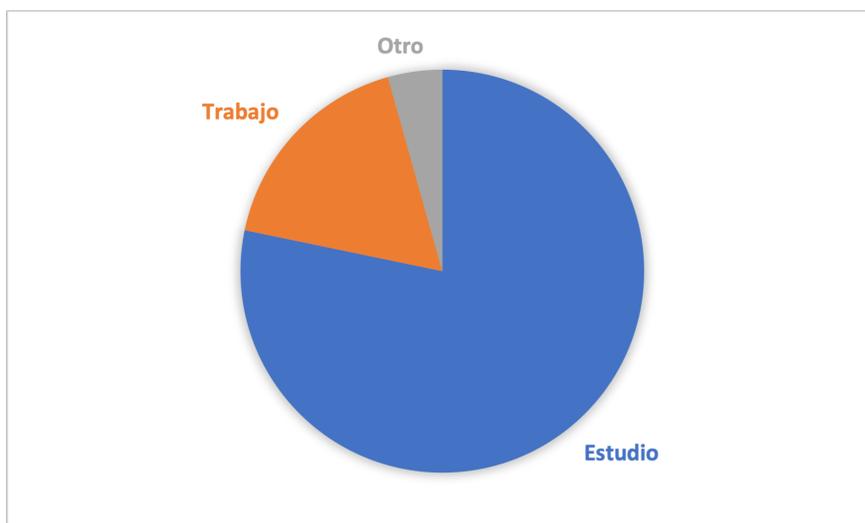


Figura 3.1: Ocupación principal del participante

Los 36 estudiantes provienen de distintas instituciones de la ciudad: 20 de ellos, son estudiantes de la fcm, 3 de la Facultad de Medicina de la UCh, 2 de la Facultad JGM de la UCh, 2 de la UDP, y 1 estudiante de la UTEM, UMayor, UAI, DUOC, UBB, PUC y UCSH, respectivamente.

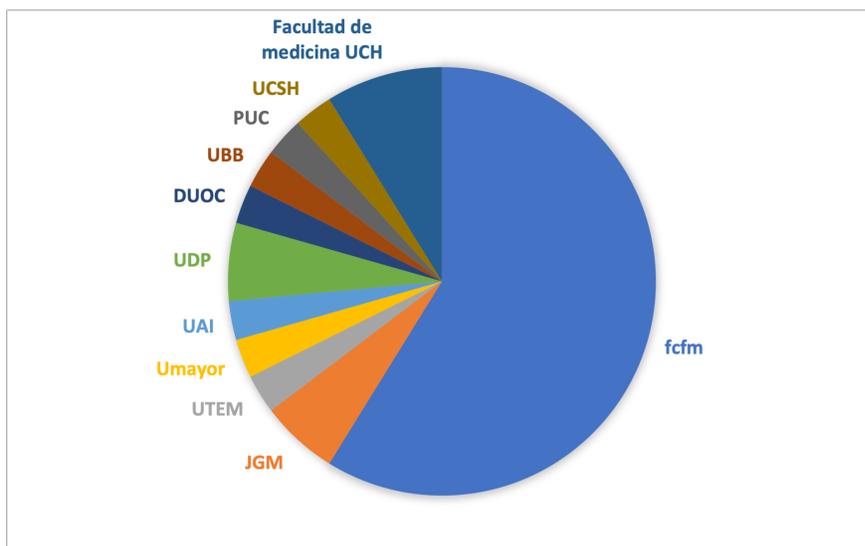


Figura 3.2: Institución a la que pertenece el estudiantes

Todo participante firma un consentimiento informado que detalla todos los alcances de la etapa de medición, así como también las responsabilidades que tiene el participante. El estudio está aprobado por el comité de ética de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En la convocatoria, no se menciona ningún requisito con respecto a la experiencia ciclista, sólo se pide saber andar en bicicleta y se aclara que todos los instrumentos a utilizar son entregados por el equipo organizador del proyecto, con el fin de facilitar la participación de éste. Además, se busca obtener una muestra heterogénea con respecto a la clasificación del participante según su experiencia en bicicleta, desde no ciclistas a ciclistas habituales. El único requisito es ser mayor de 18 años, para evitar la solicitud de permisos a tutores y hacer más expedito el proceso de inscripción.

Una vez que el participante confirma que puede participar, éste responde 3 encuestas: de salud física, de salud mental y de experiencia ciclista, para obtener información específica de cada participante, tal como:

- Índice de Masa Corporal (IMC)
- Estado de salud en general y con respecto a sus pares
- Padecimiento de enfermedades crónicas o comorbilidades
- Ocupación principal
- Clasificación de intensidad requerida en la ocupación principal (Alta, moderada o baja)
- Tipo de movilidad en general (Activa o Pasiva)
- Estados emocionales experimentados la última semana
- Identificación con pensamientos positivos o negativos
- Tiempo de experiencia en ciclismo
- Tipo de ciclismo que realiza (Deportivo, recreativo o como modo de transporte)
- Vivencias de siniestros en bicicleta y su impacto en su comportamiento

Aplicando estas encuestas, es posible obtener una representación más completa del participante, entendiendo que los valores que se obtengan en las mediciones pueden depender del estilo de vida que lleve el sujeto.

La ruta se escoge considerando que el punto de inicio y de fin sea la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile ubicada en Santiago Centro, buscando que sea variada en cuanto a los tipos de ciclovías y sus condiciones. Es esperable que se inscriban personas que sean estudiantes de la facultad o que vivan cerca del sector por la facilidad de llegada al lugar, pero no se especifica una restricción de residencia. También es esperable que algunos participantes conozcan las ciclovías antes de realizar el experimento ya que es un sector concurrido y central.

De los 46 participantes experimentados en la segunda versión, sólo 11 son residentes de la comuna Santiago centro (donde se realiza el estudio) y el resto residen en Maipú, Providencia, Ñuñoa, Puente Alto, Estación Central, Peñalolén y las Condes.

Por otro lado, 28 son ciclistas frecuentes (todas las semanas) y 18 sólo de vez en cuando. Además, 35 participantes declaran conocer el sector del recorrido y 19 declaran haber utilizado las ciclovías del circuito anteriormente. Se entiende que ningún participante conocía el proyecto en su totalidad antes de realizar la experiencia.

La información anterior (residencia, frecuencia de uso, conocimiento del sector), se registra sólo para los participantes de la segunda versión del experimento, que en adelante se nombra como versión definitiva.

3.2. Dispositivos

A continuación, se presenta una descripción de cada instrumento a utilizar durante la experiencia, seguido de su instalación al detalle:

3.2.1. Biomonitor

La pulsera Biomonitor (Jimenez-Molina, et-al. (2023); <https://isci.cl/biomonitor/>), tiene una forma similar a un SmartWatch, que se puede observar en la Figura 3.3. El Biomonitor debe conectarse vía Bluetooth a un dispositivo que sea capaz de almacenar su información. En la experiencia Piloto, este dispositivo fue un smartphone, pero había limitaciones con el sistema operativo del celular y la gama de éste. Por lo anterior, para un correcto funcionamiento del Biomonitor, en la segunda instancia de medición, la pulsera se conectó vía Bluetooth a una Raspberry Pi, que se describe en las siguientes secciones.



Figura 3.3: Biomonitor

Se enciende la pulsera en su botón superior y comienza a parpadear una luz azul. Se monta la pulsera en la muñeca del participante. Una vez que la luz azul se apague, y se encienda una luz verde en la parte trasera de la pulsera (en contacto con la piel de la persona), ésta está conectada a la Raspberry, funcionando y registrando datos de manera correcta. Lo anterior se puede corroborar conectando la Raspberry a un monitor, viendo que se despliegue la pestaña

de toma de datos.

3.2.2. Contexto ambiental

El Contextino es una plataforma de sensores de contexto, basada en el microcontrolador tipo Arduino, creado por el WeSST Lab (Web Science & Smart Technologies Lab) de la Universidad de Chile y sirve para capturar señales ambientales. (Barría, et al. 2020). Específicamente, está compuesta por 4 placas marca Grove, que poseen los siguientes sensores incorporados, con sus respectivas funciones:

1. SCD30: Sensor de CO₂, Temperatura ambiental y de Humedad
2. Light sensor v1.2: Luminosidad
3. Loudness sensor: Ruido ambiental
4. IMU 10DOF: Acelerómetro, Giroscopio, Magnetómetro y Presión. Se deriva la dirección e inclinación.



Figura 3.4: Contextino

De igual manera que el Biomonitor, el Contextino necesita estar conectado a la Raspberry Pi para registrar las señales. Una vez que se conecta el Contextino a la Raspberry, se enciende una luz naranja en la rejilla de su parte superior y cuando comienza a tomar datos de manera correcta, comienza a parpadear una luz roja en la letra C del nombre CONTEXTINO, que se ve ilustrado en la imagen anterior.

El contextINO va montado en la parrilla de la bicicleta, con un sistema de velcros en dos direcciones para su seguridad. En la Figura A1 del anexo se ilustra un soporte adecuado para el ContextINO, para evitar que se mueva y en la Figura A2 del anexo se muestra su instalación en la bicicleta.

3.2.3. Raspberry Pi

Es una computadora de bajo costo de un tamaño compacto, que puede ser conectada a un monitor de computador o un TV vía HDMI, a un mouse y un teclado estándar para trabajar en él. Se puede observar en la Figura 3.5. Esta computadora debe ir conectada a una fuente de energía y en este caso se utiliza una batería externa para ello. La Figura 4 muestra la manera de conectar los aparatos para su correcto funcionamiento. De izquierda a derecha se observa la batería externa, la Raspberry Pi y el Contextino.



Figura 3.5: Conexión Raspberry Pi - Contextino

3.2.4. Geoposicionamiento

Con el fin de poder indexar correctamente las emociones y señales a un cierto punto específico de la ruta, se registra la ubicación en tiempo real de cada participante utilizando la aplicación GuruMaps. Esta aplicación se instala en un smartphone, el cual se ubica en un soporte para celular en el manubrio de la bicicleta, que lleva el mapa abierto con la ruta guardada. Esto, con el fin de corroborar que se sigue la ruta correctamente y, además, para apoyar la imputación de los atributos de contexto al respectivo *timestamp*. En la aplicación está grabado el recorrido que debe seguir cada participante y se almacena la ruta que éste realiza.

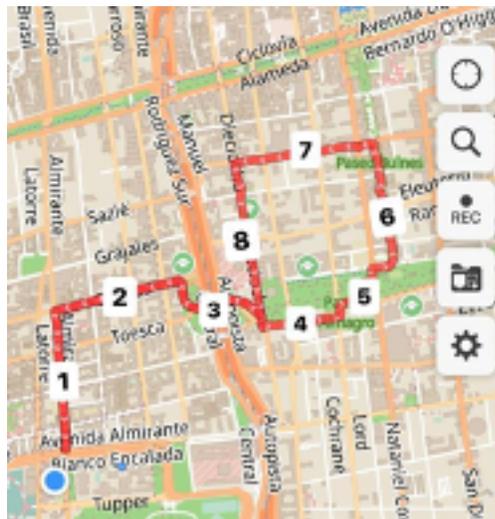


Figura 3.6: Ruta predefinida

El recorrido es: 1-2-3-4-5-6-7-8-3-2-1, es decir que los tramos 1, 2 y 3 se recorren tanto de ida como de vuelta.

3.2.5. Contexto visual

La GoPro es una cámara que generalmente se usa para registrar sesiones deportivas. Es cómoda porque es pequeña y graba vídeos de hasta 2 horas. Se elige esta manera de registrar la experiencia de cada usuario, para poder observar eventos granulares de cada una de las pruebas. Además de registrar la experiencia visualmente, se registra también el audio del viaje, lo que permite usar esta herramienta para registrar la declaración de emociones y cualquier otro comentario que se haga durante el viaje.



Figura 3.7: Cámara GoPro

3.2.6. Autorreporte de emociones

Con el fin de recoger declaraciones de emociones ante un estímulo exógeno, se incorpora un audio que pregunta cada 3 minutos la emoción que mejor representa al participante en ese momento. Este audio debe reproducirse en el smartphone que lleva cada participante y conectarlo a audífonos bluetooth. Por seguridad, el participante debe llevar sólo un audífono a un volumen moderado, para permitir que esté atento a eventualidades en la calle.

Dado que la cámara está encendida de inicio a fin, se solicita al participante que pueda reportar sus emociones tanto cuando el audio lo solicita como también cuando experimente algún estímulo que lo motive a hacerlo, si se siente cómodo con eso, de lo contrario puede responder únicamente a las preguntas del audio. Esto con el fin de obtener más información del participante a lo largo de su viaje.

Es de común conocimiento, que las emociones que experimenta un individuo no son fáciles de declarar, menos si la respuesta debe ser rápida. Es por esto, que para el reporte de emociones se utiliza el modelo circunplejo de emociones adaptado por Barría et al. (2023), basado en el modelo de Russell (1980). En este modelo se simplifica el continuo de emociones en 4 cuadrantes, con un eje horizontal de valencia y un eje vertical de activación, como se muestra a continuación:

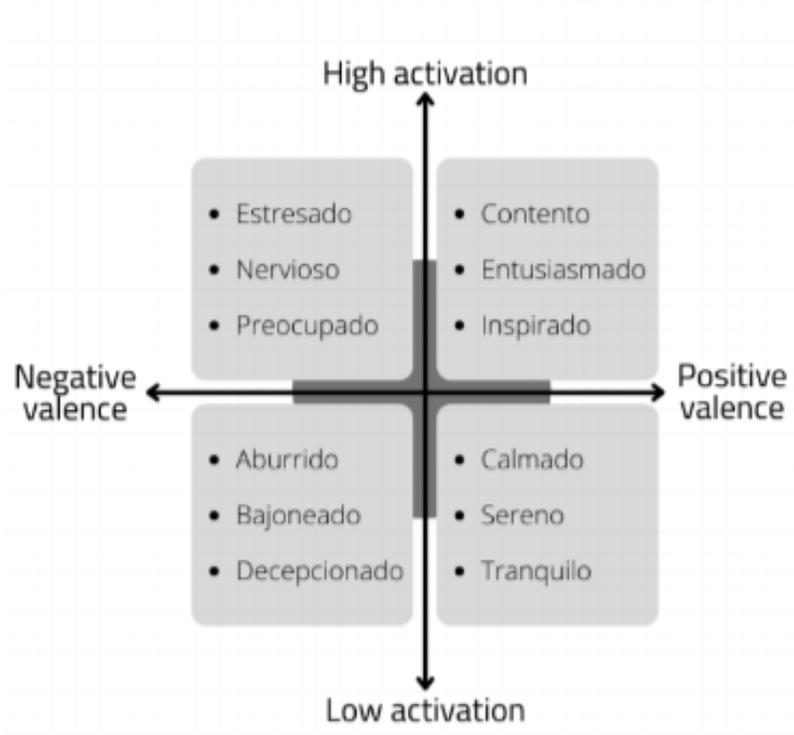


Figura 3.8: Modelo circunplejo de emociones adaptado por Barría

Barría (2020) identifican un conjunto de las 3 palabras más representativas para cada cuadrante del modelo circunplejo en un contexto de transporte en español, las que son mostradas en la Figura 3.8. En el contexto ciclista, para simplificar aún más la declaración, cada cuadrante se resume en una sola emoción representativa, la que se solicita con el audio presentado al participante: Contento, Relajado, Aburrido y Estresado.

3.3. Procedimiento experimental

El experimento cuenta con un protocolo detallado de hitos que se deben seguir. Primero, es necesario calibrar e instalar cada instrumento de medición: Biomonitor, Empatica, GPS, Contextino, GoPro, Audio emociones. Esto debe realizarse previo a la llegada de cada participante.

3.3.1. Antes de la experiencia

Se le solicita al participante que responda una encuesta de salud física antes de dirigirse a la Facultad, buscando que su tiempo de estadía sea lo más corto posible. Antes de comenzar cada experiencia, se toman los datos de identificación del participante, se registran las horas de hitos importantes, se toma la presión, se realiza una introducción al experimento, se responden las encuestas de salud mental y se capturan las líneas de base de las señales psicofisiológicas en reposo, con las pulseras Biomonitor V3.0 y Empatica, con el fin de hacer comparables las mediciones entre participantes.

Cada participante lleva una pulsera en cada muñeca, Biomonitor va conectada vía Bluetooth a una Raspberry Pi y Empatica va conectada vía Bluetooth a un smartphone. Ambas pulseras van registrando y almacenando la información de las señales de cada usuario (temperatura superficial de la piel, ritmo cardíaco, actividad electrodermal, acelerómetro y giroscopio).

Además, en el smartphone va reproduciéndose un audio conectado a audífonos, que cada 3 minutos enuncia la siguiente pregunta: “¿Cuál de las siguientes emociones te identifica en este momento?: Contento, Relajado, Aburrido o Estresado”. Estas etiquetas corresponden a la clasificación utilizada en el modelo circunplejo de emociones adaptado por Barría et al. (2023), que serán comentadas más adelante. La pregunta se responde a viva voz por cada participante, que lleva un micrófono registrando el audio del viaje.

En el mismo celular, va encendida en segundo plano la aplicación GuruMaps, registrando y almacenando la información geográfica de la ruta (latitud, longitud, altura y Timestamp). Lo anterior, con el fin de poder enlazar señales y emociones a un tramo específico de la ruta.

Por último, se lleva una cámara GoPro ubicada en el manubrio de la bicicleta, con el fin de registrar el viaje audiovisualmente. Se registran las declaraciones de emociones que realiza el participante y, además, se capturan eventos granulares relativos al viaje que puedan explicar ciertos fenómenos en el comportamiento de los datos.

Se verifica que todos los aparatos estén funcionando correctamente y tengan batería suficiente

para realizar la experiencia. Luego, el participante prueba la bicicleta en el frontis de la facultad con el fin de conocer el freno y acomodar el asiento, lo que se nombra “línea base 2”.

Se enciende el contextINO, se comienza el viaje en GuruMaps y se enciende la cámara. Una vez que la cámara está grabando, se muestra la pantalla de un celular con la hora oficial en hh:mm:ss para hacer calzar el inicio de la experiencia con la hora. Se le da la indicación al participante de que inicie la experiencia y se registra la hora en que comienza.

3.3.2. Durante la experiencia

El participante realiza la vuelta y va respondiendo a viva voz la emoción que siente cuando el audio se lo pregunta. Además, se le solicita al participante que realice comentarios o declarar emociones no sólo cuando el audio lo solicita, para obtener más información sobre cómo se siente y aprovechar que la cámara graba de manera continua.

3.3.3. Después de la experiencia

Una vez que el participante llega de vuelta a la facultad, éste debe apagar la cámara, parar el registro de posición desde el celular y comunicarse con la encargada del experimento para dirigirse a la oficina en donde se le recibió. Allí, deja la bicicleta y entrega las pulseras, audífonos, casco y chaleco reflectante.

Finalmente, se le solicita realizar una declaración de emociones post-experiencia, la cual consiste en asignar la emoción más representativa a cada uno de los tramos según lo que acaba de vivir el participante. La declaración se realiza pintando el mapa con un color asignado a cada emoción. Con lo anterior finaliza la experiencia de cada participante, se le agradece su participación y se le entrega información sobre el pago.

3.4. Bases de datos

El experimento se realiza en dos oportunidades:

1. Experimento piloto, en septiembre de 2022
2. Segunda versión del experimento, en junio de 2023

La primera instancia, se lleva a cabo por Gabriel Nova, como tesista ayudante del proyecto EMOV. Se toman las mediciones de 15 participantes, de los cuales sólo 11 son válidos. Por otra parte, para la segunda fecha se toman las mediciones de 46 participantes, de los cuales sólo 42 son válidos.

Las 8 experiencias perdidas, se consideran no válidas ya que registraron problemas, como por ejemplo, que no se prendiera algún dispositivo antes de empezar, que la bicicleta se averió durante el viaje o que el participante siguiera una ruta distinta a la que debía seguir.

En ambas ocasiones se sigue el protocolo experimental descrito en la sección 3.3., con la diferencia de que en la primera instancia no se incluyen las siguientes mediciones:

- Medición de presión arterial del participante
- Encuestas de salud mental
- Medición de señales fisiológicas con pulsera Empatica
- 'Línea base 2', donde el participante prueba la bicicleta
- Medición del contexto ambiental utilizando el ContextINO
- Declaración voluntaria de emociones o comentarios durante la ruta
- Declaración de emociones post-experiencia

Además, a diferencia de la versión Piloto, en la segunda versión del experimento, se realizan todas las mediciones con la misma bicicleta, para estandarizar la experiencia y agilizar el proceso de instalación de aparatos como el contextino, cámara, etc.

La idea inicial es juntar las mediciones de ambas experiencias para estimar el modelo de variables latentes, pero dada la cantidad de diferencias entre una experiencia y otra, se decide considerar sólo los datos de la segunda versión del experimento.

Es importante mencionar que, la principal razón para no usar los datos de la experiencia piloto, es la falta de datos de señales del entorno. Lo anterior, ya que estas medidas se consideran de manera continua en el modelo, por lo que habría que haber hecho un modelo para cada una de las experiencias, lo cual se aleja de los objetivos de esta tesis.

Entonces, a continuación se detalla el tratamiento que reciben los datos válidos de los 42 participantes de la segunda versión del experimento. Las 4 experiencias perdidas se clasifican como experiencias con Error de medición (E.M.).

3.4.1. Almacenamiento de datos

Cada participante entrega datos antes, durante y después de la experiencia, los cuales deben almacenarse de manera segura y ordenada para utilizarse posteriormente tanto en esta como en otras investigaciones.

Las encuestas realizadas antes de la experiencia quedan registradas en la plataforma Qualtrics, desde donde se exporta un archivo Excel con los resultados de todos los participantes. Luego, los datos obtenidos durante la experiencia se almacenan en la nube de Google Drive del proyecto, asignando una carpeta para cada participante, de la siguiente manera:

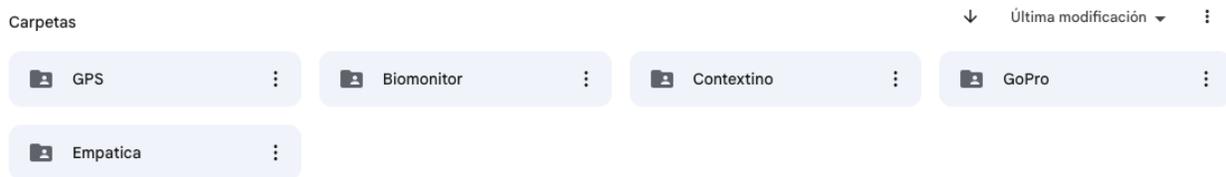


Figura 3.9: Disposición Carpeta Google Drive por participante

Lo primero, es descargar el video de la cámara y subirlo a su respectiva carpeta, ya que generalmente hay un gap de 1 hora entre que se va un participante y llega el siguiente. Una vez que el video está respaldado en la nube, se vacía la tarjeta sd de la GoPro para evitar que se quede sin memoria en el viaje siguiente.

Luego, se conecta la Raspberry a un monitor y se traspasan los archivos del Biomonitor y Contextino a un pendrive, para luego subirlos a las respectivas carpetas del participante. Se debe corroborar fecha y hora en que se crean los archivos, para asegurar que se selecciona el archivo correcto. Además, desde el smartphone se envían los archivos .gpx y .kml del geoposicionamiento y se sube a su carpeta.

Finalmente, se ingresa al sitio web www.e4realtime.com, se descargan los archivos que entrega la pulsera Empatica y se suben a la carpeta con su nombre.

Por otra parte, luego de que el participante vuelve a la facultad, se le pide que realice la declaración de emociones post experiencia, explicada en la sección 3.3.3. Se traspasa la información declarada por cada participante a una hoja de Excel.

3.4.2. Preprocesamiento de datos

Algunos de los datos obtenidos no se pueden tratar directamente, por lo que es necesario realizar un preprocesamiento para poder utilizarlos de la manera correcta. Esto ocurre sólo con algunos de los datos obtenidos durante la experiencia, los cuales se detallan a continuación:

- **ContextINO y Biomonitor:**

El primer paso es realizar la limpieza y procesamiento de los datos, el cual consiste en aplicar filtros de outliers y paso banda a cada una de las señales crudas con el objetivo de eliminar el ruido proveniente de ellas.

El segundo paso es calcular algunas señales a partir de los datos limpios, por ejemplo, a través de la fotopletismografía (PPG) se calcula el ritmo cardiaco (HR) y la variación del ritmo cardiaco (HRV), y, a través de la actividad electrodermal de la piel (GSR) se calcula el nivel de conductancia de la piel (SCL) y respuesta de conductancia de la piel (SCR). Para más detalles sobre la limpieza de las señales psicofisiológicas, revisar Jimenez-Molina et al. (2018) y Jimenez-Molina et al. (2022).

Finalmente se estructuran las señales obtenidas y se calculan distintos atributos de tendencia central como mediana, promedio, varianza, curtosis, etc. para las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, a través de la transformada rápida de Fourier, junto con otros atributos relacionados al GSR como número de peaks, área total, etc.

- **Registro audiovisual (GoPro)**

Con respecto a los videos, es necesario procesarlos para obtener la siguiente información:

- Emociones declaradas
- Eventos granulares
- Cambio de tramo
- Comentarios

Los 4 momentos de interés comentados anteriormente, se registran con su respectivo Timestamp y tramo por el que estaba pasando cada participante.

Este proceso fue realizado de forma manual, viendo cada uno de los videos. Este trabajo podría haber sido más expedito utilizando procesamiento de imágenes, que fue un camino estudiado para este proyecto, pero estaba en una fase muy preliminar y era necesario tener esta información procesada para continuar con el trabajo de tesis.

Los datos del GPS y de la pulsera Empatica no necesitan pasar por un preprocesamiento, están listos para ser utilizados.

Luego de realizar este procesamiento, se obtiene que existen experiencias en donde no se registran datos de manera continua y se decide prescindir de estas mediciones para no entorpecer el proceso de estimación, resultando 36 experiencias válidas en una primera instancia para el primer modelo a estimar y al recuperar datos de 2 experiencias, queda una base de datos con 38 experiencias válidas para el segundo modelo, los cuales se muestran en el siguiente capítulo. Las 4 experiencias perdidas se clasifican como experiencias con Datos Incompletos (D.I.).

3.4.3. Confección base de datos final

Luego de todos los filtros y procesos por los que deben pasar los datos recolectados, se procede a armar la base de datos final del estudio, que debe contener cada una de las variables a considerar.

Cada uno de los participantes tendrá 4 'familias' de datos, resultando una base de datos con el siguiente formato:

Las **variables sociodemográficas y de comportamiento ciclista** son las siguientes:

Tabla 3.1: Formato Base de Datos

Participante	Var. Sociodemográficas	Var. del viaje	Var. del Entorno	Var. fisiológicas
1				

- Género
- Edad
- Nivel de educación
- Actividad principal (Estudio, trabajo, otro)
- Experiencia en ciclismo
- Conoce el sector de la ruta
- Frecuencia mensual en ciclismo
- Tipo de ciclismo que realiza

Por otra parte, las **variables del viaje** son las siguientes:

- Tiempo de viaje
- Evento granular
- Emoción declarada
- Tramo
- Intersección

Luego, las **variables del Entorno**:

- Brillo
- Ruido
- Nivel de CO₂
- Temperatura del ambiente
- Humedad
- Eventos granulares

Y finalmente, las **variables del fisiológicas o del Biomonitor**:

- Actividad electrodermal (EDA o GSR)

- Ritmo cardiaco (HR)
- Variación del ritmo cardiaco (HRV)
- Temperatura de la piel (SKT)

Analizando el origen de cada una de estas variables, podemos agruparlas en aquellas que son discretas y aquellas que son continuas. Las primeras, son las que ocurren en un momento aleatorio y se tiene una medición sólo para ese segundo exacto. Estas son, las emociones declaradas, eventos granulares y pasos por intersecciones.

Por otra parte, las mediciones continuas son aquellas que tienen un valor en cada segundo de la experiencia. Por un lado, hay algunas que poseen el mismo valor durante todo el viaje (Sociodemográficas) y por otro lado, hay otras que van entregando un valor distinto dependiendo del fenómeno que se esté experimentando, con la frecuencia correspondiente a su aparato de medición. Esto último ocurre para las mediciones del Contextino, del Biomonitor y el Tramo por que el transita el participante. A continuación se muestra un ejemplo ilustrativo para entender mejor cómo se generan los datos y a partir de ellos, la base de datos:

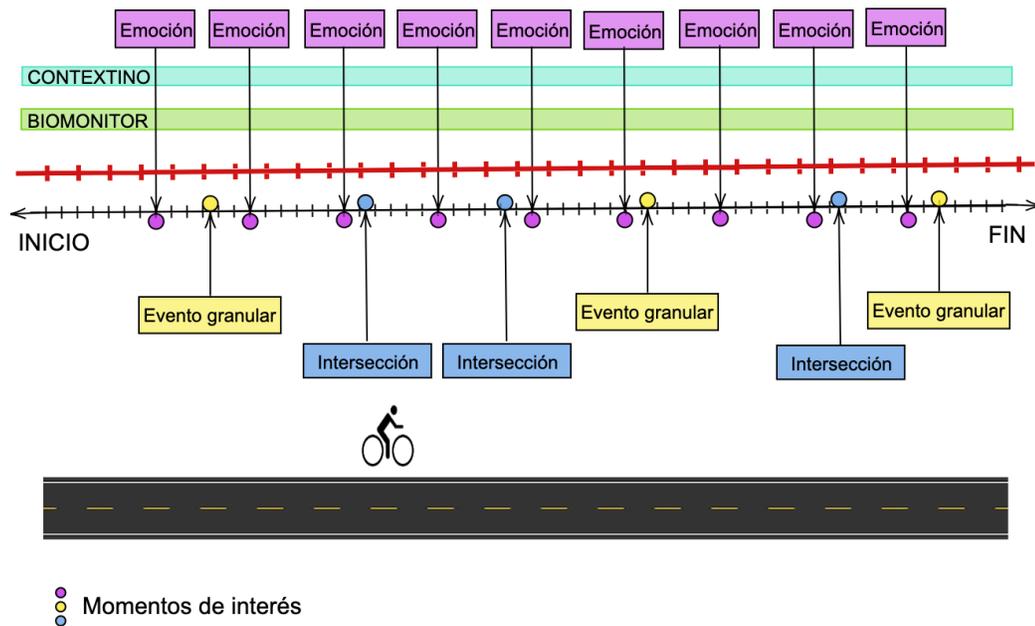


Figura 3.10: Ejemplo generación de base de datos

Como se puede observar en la figura, la cantidad de momentos de interés son pocos, considerando que los viajes duran aproximadamente 30 minutos. Y, como se poseen mediciones del Contextino y Biomonitor cada un segundo, las mediciones de éstas variables que no coinciden con el instante de interés, se pierden. Esto resulta en una base de datos de tan solo 219 filas para todos los participantes válidos, es decir 5 observaciones en promedio por participante, lo cual no es beneficioso para la estimación del modelo, ya que mientras menos información exista por participante, menos precisos son los resultados. Entonces, es necesario buscar una solución que no ignore tantos datos registrados.

Por esta razón, se decide agregar un cuarto momento de interés: Instantes cada un minuto desde que empieza la experiencia, para obtener una base de datos mas representativa del experimento. Esto se ve representado por la recta roja en la figura anterior, donde se observa que se agregan varios momentos de interés, lo que se traduce en más filas para cada participante en la base de datos, aumentando a 1153 filas, que en promedio son 30 observaciones por participante, lo cual es una ganancia significativa con respecto a la situación anterior.

Entonces, los instantes de interés son: (1) Momento en que el participante declara una emoción; (2) Momento en que ocurre un evento granular; (3) Momento en que el participante pasa por una intersección de calles y (4) Instantes cada un minuto.

Ahora, todas las familias de variables indicadas al inicio de esta sub-sección, se obtienen para cada instante de interés, es decir que se obtiene una base de datos de $N_i \times J$, con N_i : filas por participante i y J : Variables a considerar. La base de datos original completa, posee 9083 filas (para distintos Timestamp, entre todos los participantes), pero se filtra sólo para los instantes mencionados anteriormente, quedando con 1153 filas. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo queda la Base de datos para el caso de la figura 3.10, para los primeros minutos:

Tabla 3.2: Ejemplo Base de datos

ID	Tiempo [s]	Emoción	Evento granular	Intersección	Tramo	Contextino	Biomonitor
1	60	-	-	-	1	A	B
1	120	-	-	-	2	C	D
1	180	-	-	-	2	E	F
1	240	-	-	-	3	G	H
1	243	Relajado	-	-	3	I	J
1	300	-	-	-	3	K	L
1	360	-	2	-	3	M	N
1	680	-	-	Si	6	Q	R
1

De aquí, se puede observar que hay momentos en que no se registra información para cada variable, lo que podría ser un problema y se explicará más adelante en la sección de Modelación.

Más adelante en el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos al realizar la modelación, lo cual se realiza a partir de 2 modelos causales. El primero, considera la base de datos simplificada, que posee pocas filas y omite información relevante. El segundo, considera la base de datos ampliada y mejorada como se mostró anteriormente, que posee mucha más información que la anterior. La siguiente tabla muestra la cantidad de observaciones existentes por participante en cada uno de los casos descritos anteriormente:

Tabla 3.3: Cantidad de observaciones por participante

Participante	Cantidad de Observaciones	
	Modelo 1	Modelo 2
1	6	26
2	6	34
3	E.M.	E.M.
4	14	39
5	5	27
6	8	36
7	2	18
8	E.M.	E.M.
9	4	20
10	4	21
11	4	26
12	12	41
13	1	16
14	4	29
15	6	36
16	6	35
17	D.I.	D.I.
18	5	39
19	8	41
20	D.I.	D.I.
21	6	38
22	1	25
23	D.I.	34

Tabla 3.4: Continuación Cantidad de observaciones por participante

Participante	Cantidad de Observaciones	
	Modelo 1	Modelo 2
24	4	34
25	6	32
26	D.I.	D.I.
27	D.I.	28
28	4	34
29	D.I.	D.I.
30	1	22
31	7	32
32	7	35
33	E.M.	E.M.
34	4	33
35	16	44
36	8	45
37	2	13
38	5	25
39	9	31
40	7	37
41	2	27
42	9	40
43	11	37
44	E.M.	E.M.
45	11	46
46	2	10

Donde, E.M.: Error de medición y D.I.: Datos incompletos. Estos conceptos fueron explicados anteriormente en este capítulo.

3.5. Ruta seleccionada

La ruta a utilizar se selecciona estratégicamente tomando en cuenta distintas variables:

- Ancho de ciclovía
- Nivel de ciclovía
- Lado de la calle
- Unidireccional o bidireccional
- Tipo de suelo

3.5.1. Descripción de la ruta

A continuación, se presenta una descripción detallada de cada uno de los tramos, acompañada de una ilustración del perfil. El objetivo de sección es poder conocer detalles de cada uno de los tramos para asignarles niveles de calidad a cada uno de ellos y compararlos entre sí más adelante. El mapa de la ruta puede observarse nuevamente en la siguiente figura:

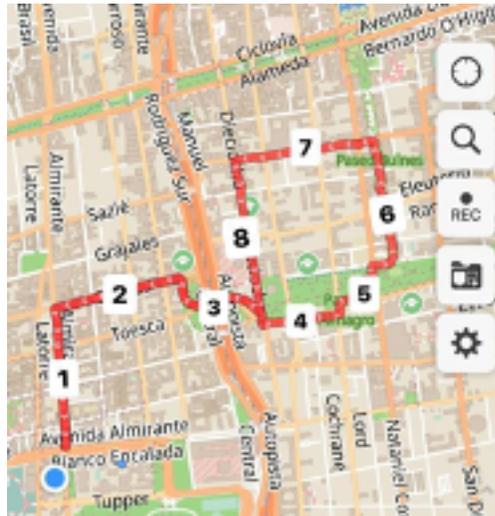


Figura 3.11: Ruta predefinida

Por otra parte, se analiza la ruta establecida buscando caracterizar y relacionar la infraestructura vial con las variables continuas definidas previamente. Se toma en cuenta el tipo de ciclovía, el sentido de ésta y características como el ancho, el nivel, tipo de superficie, entre otras cosas. Se obtiene un esquema dependiente del tiempo, que contiene la distribución de señales y emociones generadas, identificando en qué tramo se registra cada uno de los datos y cómo se caracteriza cada intervalo.

El proceso de elección de la ruta consta de 5 partes:

1. Definir a qué tipo de infraestructura se quiere apuntar, ya sea sólo ciclovías, mixto, de calidad similar o distinta entre si
2. Definir la Facultad de ciencias físicas y matemáticas como el punto de partida y de llegada
3. Escoger ciclovías cercanas a la facultad que se ajusten a los entornos que se quieren evaluar y que además sean seguras para los participantes
4. Se prueban 2 versiones del recorrido, realizándolas en bicicleta
5. Se decide optar por la versión mostrada en la figura 3.11

- **Tramo 1**

Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada. Al lado derecho de la calle y a favor del tránsito vehicular. Suelo de asfalto irregular de 2,5 [m] de ancho. La calzada es de adoquines y su capacidad es de 2 pistas.



Figura 3.12: Tramo 1

- **Tramo 2**

Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada. Al lado derecho de la calle y en contra del tránsito vehicular. Suelo de asfalto liso, de ancho 2,1 [m]. La calzada de asfalto y su capacidad es de 2 pistas.



Figura 3.13: Tramo 2

- **Tramo 3**

Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada. Al lado derecho de la calle, en una curva pronunciada y en contra del tránsito vehicular. Suelo de asfalto liso, de ancho 2,4 [m]. La calzada de asfalto y su capacidad es de 2 pistas.



Figura 3.14: Tramo 3

En la siguiente figura, se observa que la distribución del entorno cambia ligeramente. Desde Manuel Rodríguez la ciclovía está al lado izquierdo de la mediana, en contra del tránsito vehicular y la calle es de 5 pistas, 3 hacia el oriente y 2 hacia el poniente, separadas por la mediana que se ilustra en la figura:



Figura 3.15: Tramo 3

- **Tramo 4**

Ciclovía unidireccional al nivel de la calzada. Al lado derecho de la calle y a favor del tránsito vehicular. Suelo de asfalto liso, de ancho 1,8 [m]. La calzada es de asfalto y su capacidad es de 2 pistas.



Figura 3.16: Tramo 4

- **Tramo 5**

Parque con árboles, áreas verdes, juegos y asientos. Caminos amplios de ripio, ancho de 6,5 [m].

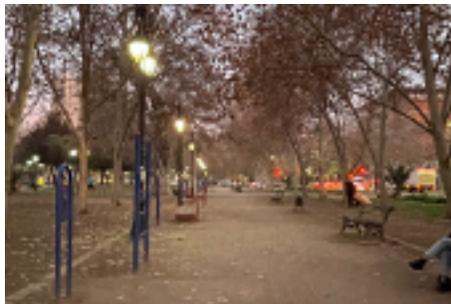


Figura 3.17: Tramo 5

- **Tramo 6**

Paseo peatonal de 11 [m] de ancho. Hay 3 piletas de agua al centro del paseo a lo largo del tramo.



Figura 3.18: Tramo 6

- **Tramo 7**

Ciclovía unidireccional al lado izquierdo de la calle y a favor del tránsito vehicular. Suelo de asfalto liso de 1 [m] de ancho. La calzada es de asfalto y su capacidad es de 3 pistas.



Figura 3.19: Tramo 7

Desde C. San Ignacio hasta Dieciocho se acaba la ciclovía y los participantes eligen si van por vereda o calzada. Además, la calzada es de 2 pistas.



Figura 3.20: Tramo 7

- **Tramo 8**

Ciclovía bidireccional al lado derecho de la calle (lado Poniente) en contra del tránsito vehicular. Ciclovía de asfalto de 2,7 [m] de ancho. Calzada de asfalto con 2 pistas, 1 de estacionamiento.



Figura 3.21: Tramo 8

Luego de analizar cada componente de la ruta establecida, se observa que los tramos pueden diferenciarse entre sí según sus características expuestas anteriormente. Teniendo esto en cuenta, es posible dilucidar las primeras hipótesis del estudio y se espera que, ante una mejor calidad de la infraestructura, se evidencien cambios significativos tanto en las señales que entrega la pulsera como las emociones que declara cada participante.

3.5.2. Clasificación de la ruta

¿A qué se le llama una ciclovía de buena o de mala calidad? Para responder a esta pregunta, se presentan 3 clasificaciones de la ruta seleccionada:

1. Clasificación según tramos asignados

La primera clasificación, es simplemente la subdivisión de la ruta en 11 tramos, como se especificó en la sección anterior (1-2-3-4-5-6-7-8-3v-2v-1v). La idea de catalogar o encasillar la ruta en tramos es que cada tramo se diferencia del otro según sus propias características, que van cambiando al pasar de una calle a otra.

- Tramo 1: Almirante Latorre entre Blanco Encalada y Gorbea
- Tramo 2: Gorbea entre Almirante Latorre y Santa Isabel
- Tramo 3: Santa Isabel entre Gorbea y Dieciocho
- Tramo 4: Santa Isabel entre Dieciocho y Lord Cochrane
- Tramo 5: Parque Almagro entre Lord Cochrane y Paseo Bulnes

- Tramo 6: Paseo Bulnes entre Mencía de los Nidos y Tarapacá
- Tramo 7: Tarapacá entre Paseo Bulnes y Dieciocho
- Tramo 8: Dieciocho entre Tarapacá y Santa Isabel

2. Clasificación basada en estudios anteriores

Luego, se busca clasificar la ruta de una manera más clara y concisa analizando los diversos tipos de ciclovías que existen, a nivel teórico. En la literatura se encuentran distintas formas de clasificar la infraestructura ciclista, a continuación, se presentan las más relevantes y en línea con este estudio:

Tabla 3.5: Clasificaciones de infraestructura ciclista

Referencia	Clasificación
Rossetti et al. (2018)	a) Sin infraestructura ciclista b) Ciclovía marcada con una línea c) Ciclovía pintada en su superficie d) Ciclovía marcada con una línea y con separadores físicos e) Ciclovía construida al nivel de la vereda
Caufield et al. (2012)	1. Sin facilidades 2. Carril Bicicleta-Bus 3. Carril Bicicleta en acera 4. Ciclovía segregada 5. Parques/Calles calmadas y residenciales

Luego de estudiar los enfoques propuestos en cada estudio, se decide adoptar la clasificación utilizada en Rossetti et al. (2018), por lo tanto, los tramos de la ruta escogida quedan clasificados de la siguiente manera:



Figura 3.22: Sin infraestructura ciclista (a)

Si bien sólo una parte del tramo 7 tiene las características de la clasificación tipo (a), se incluye de igual manera en el análisis para estudiar si existe un impacto en los participantes, ya que esta clasificación es la más riesgosa para el ciclista y los estudios muestran que es la opción menos preferida.



Figura 3.23: Ciclovía marcada con una línea (b)

Los tramos 3.2 y 4 se clasifican como tipo (b). Como se observa, estos tramos se ven expuestos al tránsito vehicular al estar separados sólo por una línea en el pavimento, que puede ser traspasada fácilmente por los vehículos.



Figura 3.24: Ciclovía marcada con su superficie pintada (c)

El tramo 7.1 se clasifica como tramo tipo (c). Esta caracterización es muy similar a la anterior, pero se asume que al estar pintada, genera un mayor sentido de alerta de parte de los automovilistas ya que es más visible que una línea.

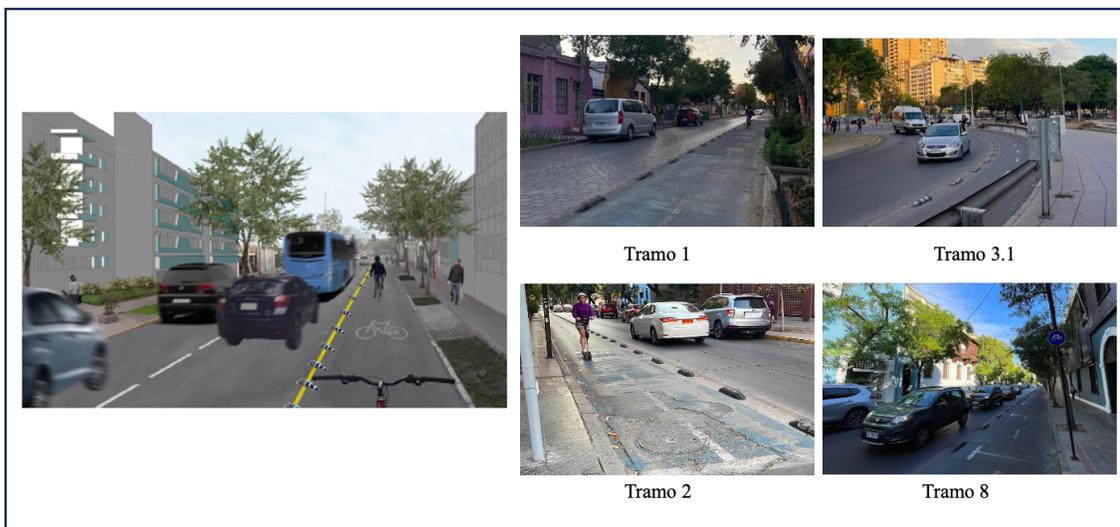


Figura 3.25: Ciclovía marcada con una línea y separadores físicos (d)

Las ciclovías con separadores físicos (tipo (d)) son las más frecuentes en la ruta utilizada, siendo el caso del tramo 1, 2, 3.1 y 8. Este tipo de ciclovía es de muy buen estándar ya que al estar físicamente segregada del tránsito vehicular, se hace menos frecuente la interacción entre vehículos y ciclistas, lo que aumenta la seguridad percibida por el ciclista.

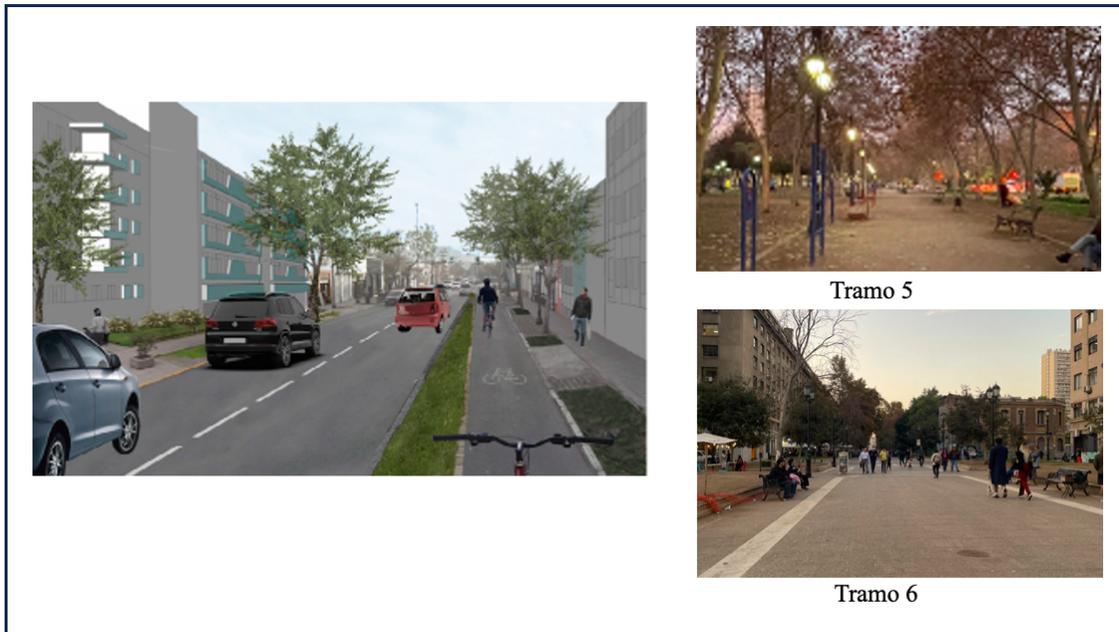


Figura 3.26: Ciclovía al nivel de la vereda (e)

Finalmente, la clasificación de ciclovías al nivel de la vereda (tipo (e)), es asignada a aquellos tramos en que se comparte el tránsito con peatones, es decir parques y paseos peatonales, que corresponden al tramo 5 y 6 respectivamente. Se reconoce que ningún tramo de la ruta es exactamente como se muestra en la figura del lado izquierdo, pero se asemeja bastante al estar al mismo nivel que los peatones.

3. Según características de la infraestructura

Para la última clasificación, se busca definir la ruta según las características del entorno, para conocer cómo influyen cada una de las características de infraestructura en el viaje. Estas características son:

- Si es ciclovía o es un Parque/Paseo peatonal
- Ancho de ciclovía
- La capacidad vehicular de la calle en la que está la ciclovía
- La cantidad de estacionamientos en la calle
- Si el ciclista va a favor o en contra del tránsito vehicular

3.5.3. Hipótesis

Basándose en la literatura estudiada y además, en la características y clasificaciones de la ruta mostradas anteriormente, es posible dilucidar las primeras hipótesis sobre cómo debieran comportarse los resultados del estudio. Se espera que:

1. existan mejores resultados en aquellos instantes en que el participante transita por ciclovías de un ancho más cercano al óptimo recomendado por la CONASET, que es de 1,8 m para las unidireccionales y de 2,4 m para las bidireccionales. (Guía de composición y diseño operacional de ciclovías, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones., 2020).
2. se prefieran aquellos tramos con menor interacción ciclista-vehículos, es decir, que la capacidad de la vía sea menor, las velocidades sean bajas y los virajes vehiculares que interrumpen la trayectoria del ciclista estén bien señalizados y se respeten.
3. ir a favor del tránsito vehicular sea percibido como algo negativo para el ciclista, ya que los autos pueden llegar por sorpresa a su lado, mientras que al ir en contra del tránsito, se puede observar si se aproxima un vehículo o no
4. se prefieran las ciclovías bidireccionales antes que las unidireccionales, ya que estas últimas son más angostas y por ende, se transita más cerca de los vehículos
5. que el tramo 3 induzca un alto estrés, debido al entorno construido (sobre autopista, pasa por un cruce con alto tráfico vehicular)
6. los tramos 5 y 6, que van por el parque y por el paseo peatonal, entreguen resultados que concluyan un menor estrés, ya que no hay interacción con vehículos y el espacio disponible para transitar es mucho mayor que en las ciclovías
7. por otro lado, que los tramos 5 y 6 no sean los preferidos, ya que al estar al nivel de la vereda hay más interacción con peatones, lo que puede traducirse en una mayor tasa de siniestros, dados los movimientos y velocidades inciertas que caracterizan a los peatones

3.5.4. Estadística descriptiva de emociones declaradas

En el estudio, hubo 43 participantes que declararon emociones a lo largo del viaje de manera correcta, y a continuación se presenta un análisis de estas declaraciones, como primer acercamiento a los resultados del experimento. Se presenta una estadística descriptiva de las emociones que se declaran a lo largo del viaje, con el siguiente gráfico de barras, que agrupa las emociones que se declaran por cada uno de los tramos de la ruta utilizada:

De la figura 3.27 se puede observar una predominancia de las emociones Relajado y Contento, lo que refleja que las emociones positivas son más comunes al andar en bicicleta en comparación a las negativas. Además, se observa una disminución en las emociones positivas y un aumento en las emociones negativas al pasar por los tramos 3 y 4. Lo anterior, evidencia que los tramos 3 y 4 generan repercusiones negativas en los ciclistas, lo que puede ser explicado por la descripción realizada en la sección 3.5.1, con la información de cada tramo. El tramo 3 pasa sobre la autopista Central, donde hay mucho tráfico, ruido y las condiciones del entorno son poco seguras ya que la ciclovía va a un costado de la mediana y no hay separadores físicos. El tramo 4 es más tranquilo, ya que pasa por una calle con menos tráfico, pero es angosta y los automóviles pasan muy cerca del ciclista.

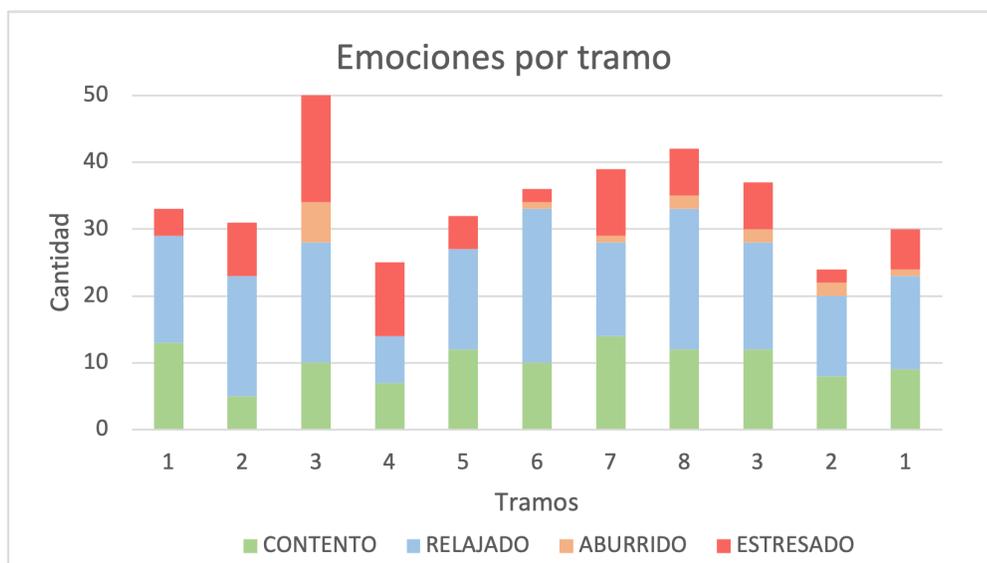


Figura 3.27: Distribución de emociones por tramo

Como el audio es reproducido cada 3 minutos, la velocidad del ciclista varía a lo largo del viaje, hay unos tramos más largos que otros y el ciclista pasa por cruces semaforizados que podrían detener su viaje, no se puede asegurar que el audio se reproduzca en cada uno de los tramos. Entonces, como se observa en la figura 3.24, hay algunos tramos que muestran más declaraciones que otros, lo que se explica porque el audio se reprodujo más veces en un tramo que en otros.

Más detalladamente, se tiene lo siguiente:

- 174 declaraciones de la emoción Relajado
- 112 declaraciones de la emoción Contento
- 78 declaraciones de la emoción Estresado
- 15 declaraciones de la emoción Aburrido
- El tramo que más registros posee de la emoción Relajado es el tramo 6 (Paseo peatonal; 23 declaraciones), seguido del tramo 8 (calle Dieciocho; 21 declaraciones).
- En el caso de la emoción Contento, el tramo 7 (calle Tarapacá) es el que registra más declaraciones (14), seguido del tramo 1 (Almirante Latorre; 13 declaraciones).
- Para la emoción Estresado, el tramo con más registros es el 3 (Calle Santa Isabel, sobre la autopista; 16 declaraciones).
- Finalmente, el tramo que más registra declaraciones de Aburrido es el tramo 3 (Calle Santa Isabel, sobre la autopista; 6 declaraciones).

Lo anterior, es un reporte de resultados del cual no se pueden desprender conclusiones representativas directamente ya que las declaraciones de emociones no están distribuidas homogéneamente a lo largo del viaje y la muestra no es lo suficientemente grande. De igual

manera, se analiza si las hipótesis expuestas en la sección anterior se cumplen o no según las emociones que declaran los participantes.

1. Las ciclovías de mayor ancho (tramos 1, 2, 3 y 8) **si** registran emociones más positivas que aquellas ciclovías más angostas (tramos 4 y 7)
2. Los participantes **si** perciben de manera positiva aquellos tramos con menor interacción con otros dispositivos de transporte (Vehículos/peatones)
3. Con respecto a la influencia del sentido de los vehículos, **no** se observa una preferencia por las ciclovías que van en contra del tránsito vehicular
4. **No** se observa una preferencia por las ciclovías bidireccionales (tramos 1, 2, 3 y 8) con respecto a las ciclovías unidireccionales (tramos 4 y 7)
5. Se observa que el tramo 3 **si** induce mucho más estrés que los demás tramos
6. Los tramos 5 y 6 **si** registran menor estrés con respecto a los tramos subyacentes a éstos.
7. **No** se observa que los tramos 5 y 6 sean menos preferidos que los demás, incluso son de los que tienen más declaraciones positivas

Es importante mencionar, que este análisis del cumplimiento de hipótesis se realiza sólo en función de las emociones declaradas. Más adelante se detalla una evaluación del cumplimiento de hipótesis según los resultados de la modelación.

Por otra parte, tomando en cuenta el trabajo realizado por Barría et al. (2023), se utiliza su adaptación del modelo circumplejo de Emociones y su visión de la Valencia y Activación para clasificar las declaraciones. Según el Modelo circumplejo de emociones de Russell, los estados emocionales se componen de sensaciones que emergen de la actividad de dos sistemas neurofisiológicos básicos (Posner et al., 2005; Russell, 1980). El primero corresponde a un continuo de placer y desagrado, el cual es llamado valencia y el segundo corresponde a un continuo de alta y baja excitación o exaltación, llamado activación.

Entonces, cuando se declara alguna emoción, esta puede clasificarse según su Valencia y su Activación, otorgándole un valor Positivo o Negativo y Alto o Bajo, respectivamente. Para simplificar el análisis de las declaraciones, y relacionarlo más directamente con la percepción de emociones positivas y negativas, en adelante se habla de Valencia positiva, para Contento o Relajado y Valencia negativa para Aburrido o Estresado. Esta clasificación divide en 2 las emociones en vez de 4, lo que lo hace más simple.

A continuación, se presenta la distribución de la Valencia y de la Activación a lo largo de los tramos.

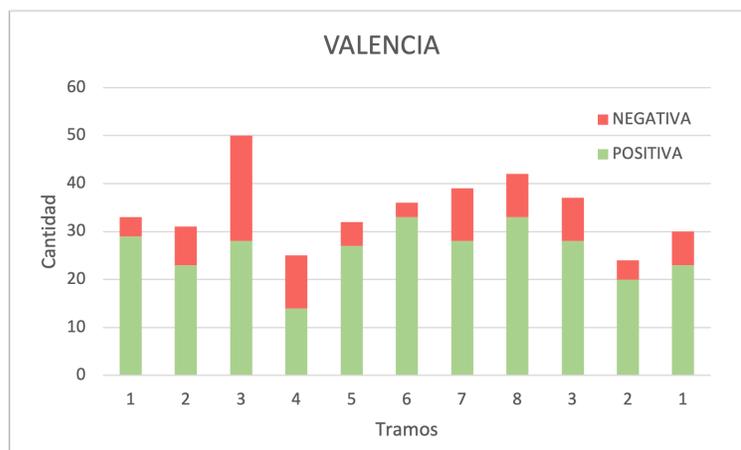


Figura 3.28: Distribución Valencia

De aquí, se observa directamente que se registran más emociones positivas que emociones negativas durante las experiencias de los participantes. Al registrarse emociones más ligadas al placer que al desagrado (definición de Valencia), se plantea que existe un gusto por andar en bicicleta en los participantes. Esto último, es un resultado conveniente, ya que más adelante en la modelación se toma la valencia como una variable explicada por la Utilidad instantánea que experimenta un usuario.

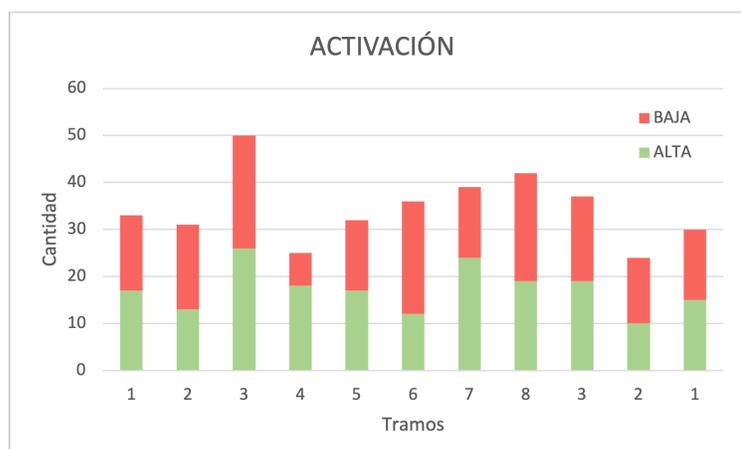


Figura 3.29: Distribución Activación

Por otra parte, se tiene que las emociones excitantes y no excitantes se reparten casi equitativamente en cada tramo. Esto habla de que aproximadamente la mitad de los participantes vive emociones 'activas' como Contento o Estresado y la otra mitad vive emociones 'no activas' como Relajado o Aburrido. La activación no es un concepto muy relevante para esta investigación, por lo que en adelante nos referimos sólo a la Valencia al hablar de emociones. Es importante mencionar que la bicicleta es un modo de transporte interactivo que conlleva un ejercicio físico de por medio, a diferencia de otros en que incluso se podría dormir en el viaje, lo que podría traducirse como un modo en el que las emociones se viven de manera más activa que otros.

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1. Detección de diferencias significativas entre los tramos de interés

A continuación, se ilustra un gráfico a modo de ejemplo con el comportamiento de las señales fisiológicas que entrega un participante, sólo para evidenciar cómo van cambiando las señales a medida que el éste avanza en el recorrido.

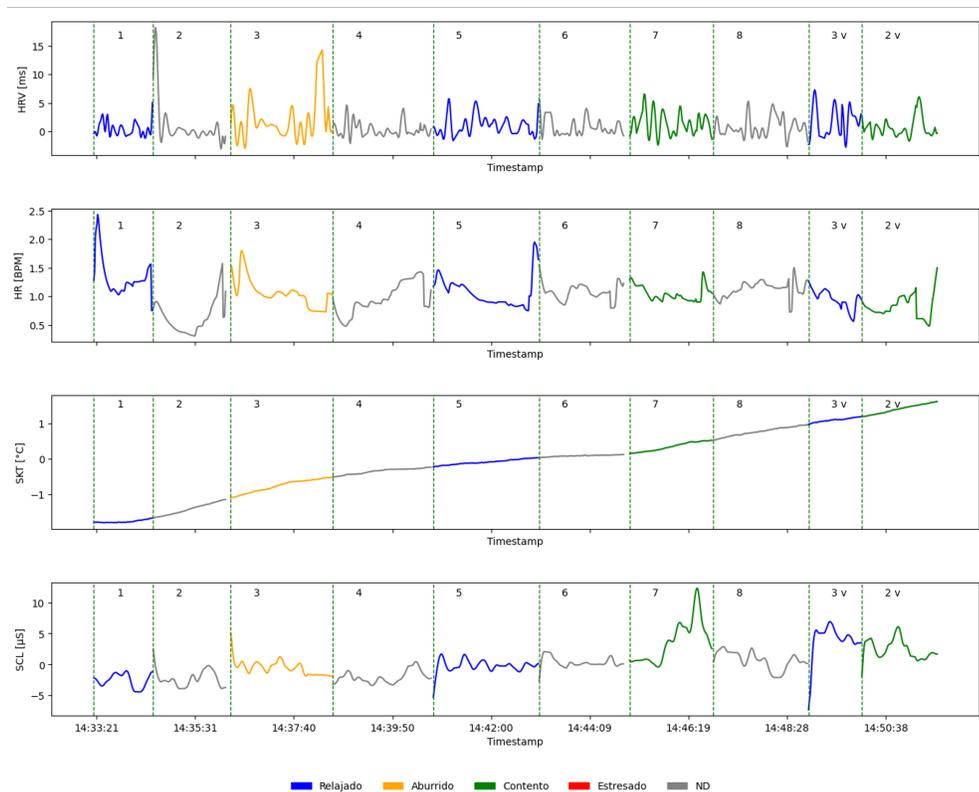


Figura 4.1: Comportamiento señales Participante 15

De arriba hacia abajo, los graficos son:

1. del HRV [ms]
2. del HR [BPM]
3. del SKT [°C]
4. del SCL [μ S]

Además, se presenta la señal pintada según la emoción que declaró en ese tramo, para ofrecer una mejor representación de cómo afecta el viaje en el participante. Donde, **Azul** es Relajado; **Amarillo** es Aburrido; **Verde** es Contento; **Rojo** es Estresado y **Gris** es No Declara Emoción en ese tramo.

Con respecto al ritmo cardiaco y su variación (HR y HRV), se observa que son señales que experimentan cambios con respecto al tiempo, lo que puede estar explicado por distintos estímulos dinámicos propios del viaje. El ritmo cardiaco de un usuario en bicicleta puede aumentar ante un aumento del ejercicio físico, mantener un estado de alerta o experimentar un acontecimiento alarmante.

La temperatura de la piel (SKT), refleja un aumento sostenido a lo largo del recorrido, lo cual puede ser un efecto directo de la misma actividad física, sumado al aumento de situaciones estresantes que pueden alterar las respuestas fisiológicas del cuerpo.

Finalmente, la señal más relevante para este estudio (SCL), presenta un comportamiento constante a lo largo del viaje, con un comportamiento sostenido y luego, en el tramo 7 se observa un salto en la señal, lo que puede corresponder a un estímulo de estrés.

La actividad electrodermal (EDA o GSR) puede descomponerse en SCL Y SCR, a nivel base (fásico) y tónico, respectivamente. Los análisis que se muestran a continuación, se realizan a partir de los gráficos de caja de la señal SCL entre los tramos de interés. Lo anterior, porque entrega una representación más directa de los efectos del estrés.

4.1.1. Test de varianza ANOVA

Con el fin de probar la hipótesis de que, al cambiar de infraestructura (es decir, que el participante recorre la ruta), se generan cambios en las señales fisiológicas que entrega el usuario, se aplican test de varianza en cada escenario. Se analizan estos cambios entre pares de tramos consecutivos y pares de tramos de interés que tengan diferencias de infraestructura evidentes. La hipótesis nula de dicho test es que los promedios muestrales de los dos grupos comparados son iguales. Para efectos de este trabajo se considera una variable significativa cuando se puede rechazar la hipótesis nula con un 95 % o más de probabilidad, es decir un t-ratio $\geq 1,96$. Cabe recordar que se utiliza un test-t de 2 colas, con un tamaño de muestra grande, mayor a 30.

Para esto, se realiza una prueba de análisis de varianza: ANOVA, donde se analizan las medias de variables cuantitativas. Primero, se estudia la significancia al pasar de un tramo a otro

consecutivo, obteniendo resultados poco concluyentes, es decir, no significativos. Luego, se analizan las diferencias entre dos tramos de interés, que según las hipótesis debieran generar cambios en las señales.

Por ejemplo, El tramo 1 y 2, que son ciclovías al nivel de la calzada, segregadas de los vehículos por separadores físicos y que están ubicados en calles tranquilas, debieran presentar mejores indicadores de satisfacción en los participantes, a diferencia del tramo 3 y 4, que son ciclovías sin segregación física ubicadas en calles más transitadas y con más estímulos estresores. Lo mismo sucede con los tramos 5 y 6 que son un parque y un paseo peatonal, es decir que están al nivel de la vereda, exponiendo al ciclista a interacciones con peatones, lo cual puede ser una situación estresante, en comparación con el tramo 8, que es una ciclovía ancha con segregación física, ubicada en una calle muy tranquila. Bajo esta premisa, se analizan las diferencias entre este tipo de tramos. A continuación, se presentan algunos de los resultados más concluyentes, ilustrados en gráficos de Box Plot:

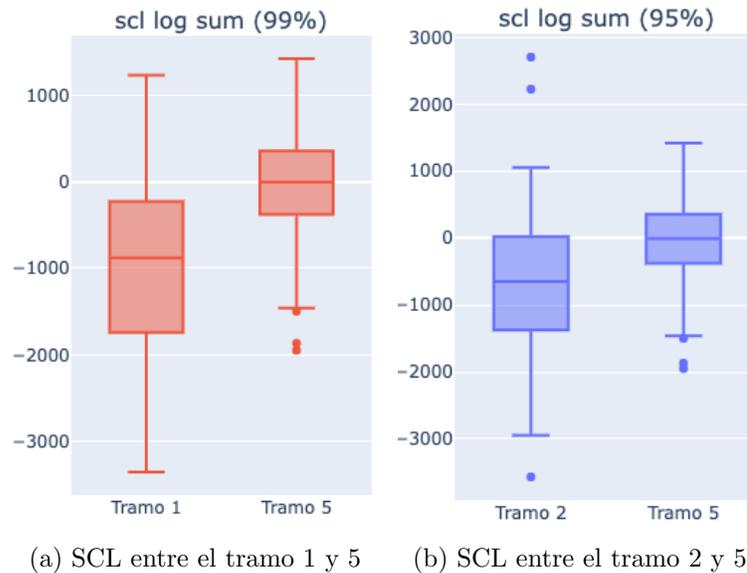


Figura 4.2: Resultados test ANOVA

Aquí, se compara el tramo 1 y 2 versus el tramo 5, que como se comenta más arriba, tienen características distintas, que dan un indicio de que debieran generar repercusiones en los usuarios. Se analiza el SCL por su relación directa con el estrés, y en los gráficos 4.2 (a) y (b), se observa un mayor estrés en el tramo 5, en comparación al tramo 1 y 2. Esto último guarda relación con las hipótesis presentadas en el párrafo anterior.

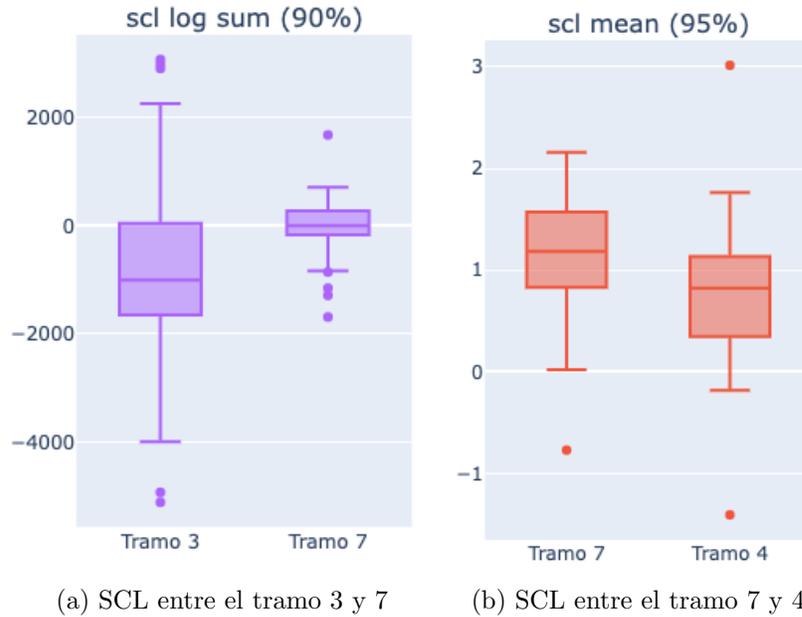


Figura 4.3: Resultados test ANOVA (continuación)

Ahora, se observa que el tramo 7 es más estresante que el tramo 3 y 4. Estos resultados son interesantes, ya que según las clasificaciones estudiadas y presentadas, el tramo 3 y 4 tienden a ser percibidos como inseguros por los ciclistas, mientras que el tramo 7, si bien no tiene una configuración perfecta, se esperaría que fuese mejor percibida que los otros. Una posible explicación para esto, es que es las señales electrodermales son una manifestación de la actividad en las glándulas sudoríparas ecninas, las cuales están inervadas por la rama simpática del Sistema Nervioso Autónomo (SNA), principalmente por los nervios sudomotores (Fowles et al., 2007). Es decir que, se espera que mientras más tiempo se lleve andando en bicicleta (es decir, mayor probabilidad de crear sudor), las mediciones del EDA (o SCL en este caso) sean más altas.

4.2. Modelo causal

4.2.1. Marco Conceptual

En el contexto de modelos de elección discreta, la utilidad instantánea (UI) es una variable latente, que representa la preferencia o la utilidad que un individuo asigna a una opción particular en un momento específico, mientras experimenta la alternativa. Esta preferencia se modela como una función de diversas variables explicativas, que pueden ser el tiempo de viaje, el costo de viaje, el hacinamiento, entre otras.

La ecuación estructural que relaciona las variables explicativas con la UI, se construye a través de los coeficientes asociados a cada variable explicativa (β_i). La combinación lineal de estas variables con sus respectivos coeficientes, da como resultado la UI que se estima con el modelo de variables latentes.

En resumen, las variables explicativas afectan a la UI, por lo tanto influyen en la elección que el individuo realiza en un momento dado, ya que generalmente se elige la opción que maximiza la utilidad instantánea que percibe el usuario.

En este modelo, se tienen múltiples ecuaciones que están interrelacionadas simultáneamente. Por un lado están las relaciones estructurales, con tres tipos de variables independientes: del entorno, del viaje y de la persona. Estas variables independientes se modelan a través de una ecuación estructural, que explica la Utilidad Instantánea (UI). La ecuación queda de la siguiente manera:

$$UI = \alpha_0 + \beta_E \cdot E + \beta_v \cdot V + \beta_S \cdot S + \varepsilon \cdot d \quad (4.1)$$

Donde:

α_0 : Intercepto

E : Variables del Entorno

V : Variables del viaje

S : Variables Sociodemográficas o del individuo

Cabe recalcar, que “Entorno”, “Viaje” y “Sociodemográficas” corresponden a todas las variables independientes de esa familia de variables, no es sólo una variable. Por otro lado, se destaca también que, para reducir notación, se han omitido en la ecuación un subíndice n referido al individuo y un subíndice t referido al momento o instante en que se está teniendo la experiencia.

Por el otro lado, están las relaciones de medición, con 2 tipos de variables dependientes: de las emociones (Valencia declarada) y del estado fisiológico de la persona medido mediante las señales recolectadas con la pulsera Biomonitor (EDA, HR, HRV y SKT). Estas variables dependientes se modelan a través de las ecuaciones de medición, que expresan cómo cada una de ellas está influenciada por la Utilidad Instantánea. Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$Valencia = \gamma_{valencia} \cdot UI + \eta_{medicion_{vat}} \quad (4.2)$$

$$EDA = \gamma_{eda} \cdot UI + \eta_{medicion_{eda}} \quad (4.3)$$

$$HR = \gamma_{HR} \cdot UI + \eta_{med-hr} \quad (4.4)$$

$$HRV = \gamma_{HRV} \cdot UI + \eta_{med-hrv} \quad (4.5)$$

$$SKT = \gamma_{SKT} \cdot UI + \eta_{med-skt} \quad (4.6)$$

Los coeficientes α_0 , $\beta_{entorno}$, β_{viaje} , $\beta_{individuo}$, $\gamma_{valencia}$, γ_{eda} , γ_{hr} , γ_{hrv} y γ_{skt} son parámetros a estimar por el modelo. Los términos de error representan la variabilidad no explicada en la relación entre la variable dependiente y la variable independiente. Estos modelos estructurales simultáneos pueden estimarse utilizando métodos como la máxima verosimilitud. La ecuación 4.2 corresponde a la ecuación estructural y las ecuaciones 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, corresponden a las ecuaciones de medición.

Se espera que los parámetros expuestos en las ecuaciones anteriores tengan ciertos signos, que tienen relación sobre cómo interactúa la variable asociada a cada parámetro en la Utilidad Instantánea. Con respecto a las variables del entorno, se espera que el CO₂, el Brillo, el Ruido, la Temperatura y la humedad interactúen de manera negativa en la utilidad. Luego, para las variables del viaje, se espera que al transitar por un tramo con buenos niveles de servicio, la utilidad aumente, que a medida que aumenta el tiempo de viaje, la utilidad tienda a mejorar, ya que el participante se siente más seguro durante el viaje, y que a mayor velocidad se esté más expuesto a situaciones de estrés, por ende que la utilidad tienda a disminuir. Con respecto a las variables sociodemográficas, se espera que los participantes que declaran ser hombres, se sientan más cómodos andando en bicicleta, es decir que tengan Utilidades más altas. Por otra parte, que si el ciclista conoce el lugar y posee experiencia andando en bicicleta, el viaje sea más tranquilo y esos parámetros respondan de manera positiva a la Utilidad. Finalmente, con respecto a los parámetros de las ecuaciones de medición (de la Valencia y del Biomonitor), se espera que una valencia positiva sea explicada por una utilidad positiva. Además, se espera que un aumento en el estrés, es decir en las señales del EDA, HR y HRV, pueda ser explicado por una disminución de la Utilidad Instantánea. La temperatura de la piel es difícil de interpretar, ya que podría atribuirse a un estado de alerta (estresado), pero al ser un estudio que se realiza en bicicleta y que conlleva un esfuerzo físico, es probable que un aumento en la temperatura de la piel esté explicado por la actividad física más que por la experiencia de estar andando en bicicleta y recibiendo los estímulos que se están evaluando.

La descripción del modelo expuesta anteriormente, se ve resumida en el siguiente cuadro:

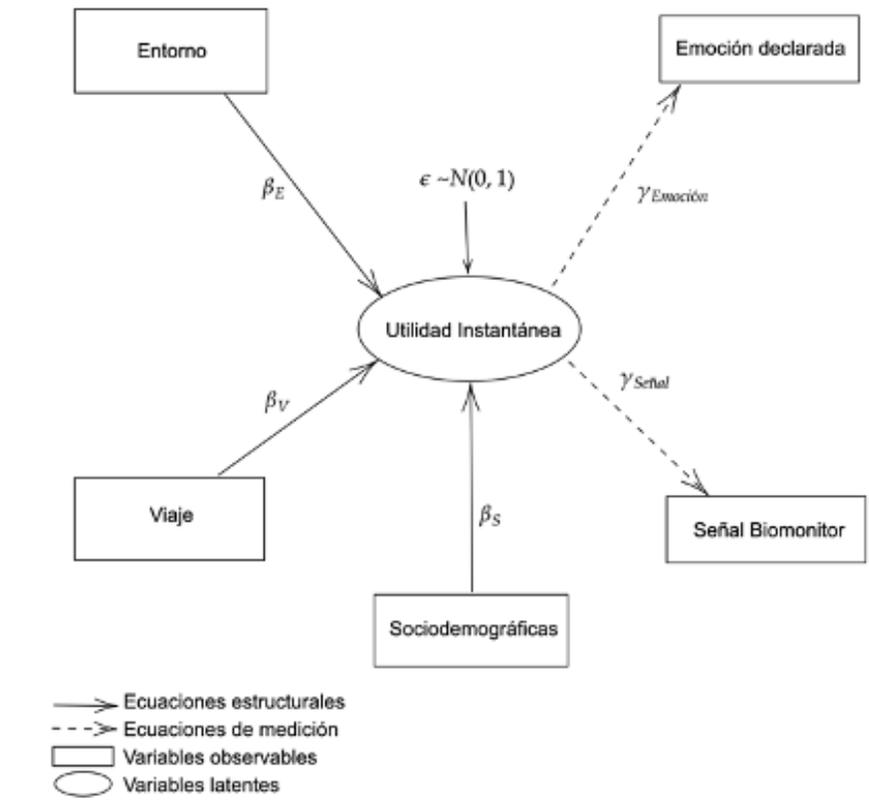


Figura 4.4: Marco Conceptual

En esta figura las relaciones estructurales se ven representadas por una flecha continua, que va desde la variable explicativa hacia la variable explicada. En cambio, las relaciones de medición se representan por una flecha discontinua, que va desde la variable explicativa hacia la variable explicada. Por otro lado, la variable latente (UI) se representa con un óvalo, y las variables medidas se representan con rectángulos.

4.2.2. Modelación

La modelación se realiza en el entorno de desarrollo Rstudio, utilizando la biblioteca Apollo para realizar la estimación. A continuación, se presenta en detalle las partes del código:

1. **Carga y normalización de datos:** Se lee un archivo .csv que contiene los datos tomados durante las experiencias de los participantes. Se realiza la normalización de los datos requeridos.
2. **Inicialización de Apollo:** Se inicializa Apollo con ciertos parámetros, como el nombre del modelo, el identificador del individuo, la habilitación del MixedLogit, el número de núcleos y el directorio de salida.

3. **Definición de parámetros del modelo:** Se define un vector de parámetros (apollo_beta), que incluye parámetros fijos (apollo_fixed) y parámetros aleatorios. Algunos parámetros corresponden a la Utilidad Instantánea (UI) y otros están relacionados con las variables fisiológicas (EDA, HR, HRV, SKT).
4. **Definición de componentes aleatorios:** Se establecen los parámetros para la generación de extracciones aleatorias, con la función `apollo_randCoeff = function(apollo_beta, apollo_inputs)`.
5. **Definición de funciones para cálculos de probabilidades y utilidades:** Se definen funciones para calcular las probabilidades y utilidades del modelo. Se establecen densidades normales para variables fisiológicas y se calculan las probabilidades para la Valencia utilizando un modelo Logit Multinomial.
6. **Validación y combinación de modelos:** Se validan y combinan modelos de probabilidades.
7. **Estimación del modelo:** Se estima el modelo utilizando el método BFGS.
8. **Salida del modelo:** Se imprime y guarda la salida del modelo.

El método Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS), es un algoritmo de optimización que aproxima la matriz del Hessiano para encontrar el mínimo de una función. Es parte de los métodos cuasi-Newton, que son eficientes para la optimización de funciones no lineales complejas. (Dennis and Moré, 1977)

Para la modelación, se fijan los valores iniciales de los parámetros en el vector 'apollo_beta' en el Paso 3. Luego, se crea un vector llamado 'apollo_fixed', donde se ingresan aquellos parámetros que no se estiman, que en este caso son γ_{val} , $\eta_{med-val}$ y d .

Es importante mencionar que, el código pionero es desarrollado por Bastián Henríquez (Henríquez-Jara et al., 2023), quien se encuentra trabajando en el presente proyecto, específicamente en el experimento realizado en Transporte público. A dicho código se le aplican ciertas modificaciones para ser utilizado en el contexto del experimento en Bicicleta.

4.2.3. Resultados Modelación en R

Modelo 1: Base de datos simplificada (Sólo instantes con emociones declaradas)

La primera versión del modelo es la más simplificada, ya que no considera todas las variables disponibles y, además, estima los parámetros considerando sólo aquellos instantes en que la persona declara alguna emoción. El problema de esto, es que algunos participantes declaran sólo 3 emociones a lo largo del viaje, es decir que la base de datos sólo tiene 3 filas con datos para ese participante, lo cual puede generar una estimación poco razonable.

Cabe recalcar que, las mediciones de las señales fisiológicas y del entorno están medidas cada 1 segundo y luego pasan por un procesamiento en el que se generan ventanas de tiempo de 6

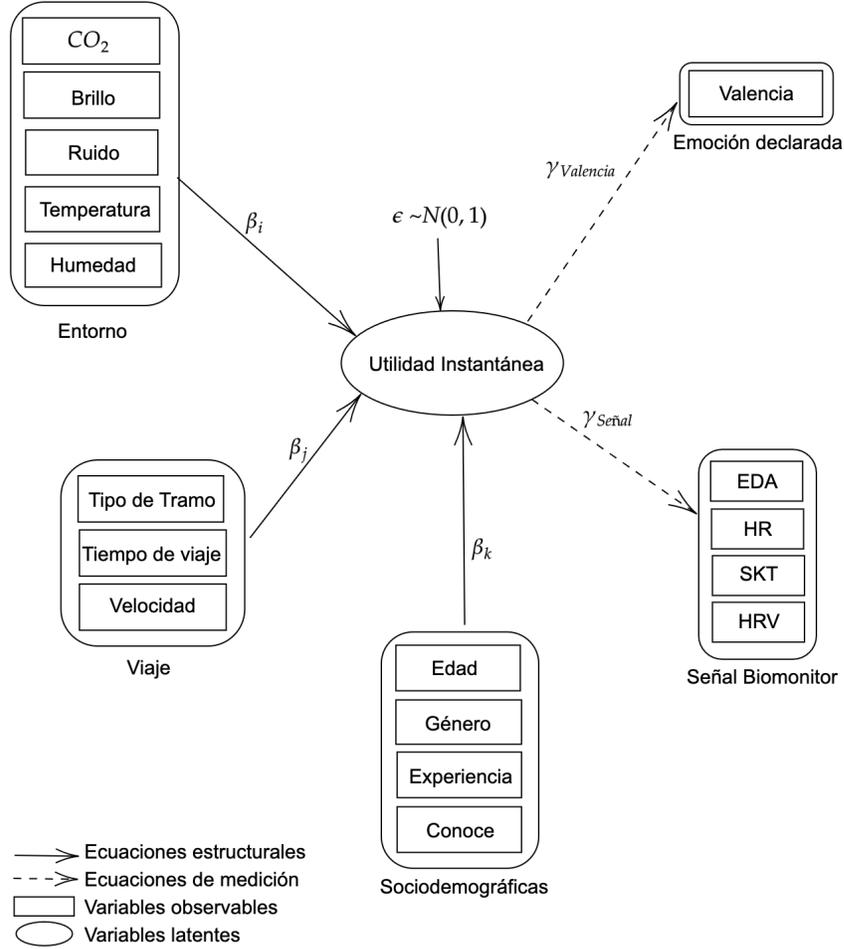


Figura 4.5: Marco Conceptual modelo 1

segundos, almacenando los datos continuamente para esos intervalos de tiempo. Sumado a las anteriores, están las variables como el tiempo de viaje, la velocidad y el tramo, que también son continuas. Entonces, al analizar sólo los instantes en que existe emoción declarada, se ignora una gran cantidad de *Timestamp* en los que si hay datos, lo que es una pérdida para la estimación. De igual manera, se estima el modelo con esta base de datos reducida, que posee 219 filas con información para todos los participantes válidos (36).

Como versión preliminar, se clasifican los tramos en “Bueno”, “Medio” o “Malo”, según las hipótesis planteadas anteriormente en la sección 3.5.3. Se asume que esta clasificación es ambigua y no es la ideal, pero se utiliza como primer enfoque para conocer si la estimación entrega resultados esperados.

Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$UI = \alpha_0 + \beta_C \cdot C + \beta_{tv} \cdot tv + \beta_{TT_i} \cdot (TT_i == 1) + \beta_S \cdot S + \varepsilon \cdot d \quad (4.7)$$

$$Valencia = \gamma_{valencia} \cdot UI + \eta_{med-val} \quad (4.8)$$

$$EDA = \gamma_{EDA} \cdot UI + \eta_{med-eda} \quad (4.9)$$

$$HR = \gamma_{HR} \cdot UI + \eta_{med-hr} \quad (4.10)$$

$$HRV = \gamma_{HRV} \cdot UI + \eta_{med-hrv} \quad (4.11)$$

$$SKT = \gamma_{SKT} \cdot UI + \eta_{med-skt} \quad (4.12)$$

Donde:

α_0 : Intercepto

C : Variables del Contextino

tv : Tiempo de viaje

TT_i : Tipo de tramo

S : Variables Sociodemográficas o del individuo

ε : Error aleatorio

d: constante

En esta tesis, se consideran significativos aquellos resultados que entreguen un p-value < 0.05 , es decir con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, aquellos valores que resulten significativos al 90%, se reportan de igual manera ya que también es valioso tener en conocimiento cuáles son aquellos valores que se acercan a lo esperado. Los resultados de la estimación en R son los siguientes:

Tabla 4.1: Resultados Modelo 1

Parámetro	Estimate	Robust s.e	Robust t-ratio (0)
α_0	-1.96	2.010	-0.978
β_{CO_2}	-0.182	0.252	-0.723
β_{brillo}	0.00425	0.212	0.019
β_{ruido}	-0.103	0.161	-0.641
β_{temp}	0.363	0.251	1.44
β_{hum}	0.0278	0.164	0.169
β_{edad}	0.111	0.0714	1.55
β_{genero}	-0.721	0.557	-1.29
β_{conoce}	0.531	0.488	1.08
β_{t1}	1.34	0.871	1.54
β_{t2}	0.795	0.698	1.13
β_{t3}	-0.0236	0.826	-0.0285
β_{tv}	-4.74e-5	<.001	-0.0889
$\gamma_{valencia}$	1		
γ_{gsr}	0.00133	0.0671	0.0198
γ_{hr}	-0.0219	0.0348	-0.628
γ_{skt}	-0.135	0.0905	-1.49
γ_{hrv}	0.0190	0.0524	0.363
γ_{skt-t}	3.56e-4	<.001	2.17*
$\eta_{med-valencia}$	0		
$\eta_{med-eda}$	0.997	0.0880	11.3
η_{med-hr}	0.996	0.0656	15.1
$\eta_{med-skt}$	0.966	0.125	7.71
$\eta_{med-hrv}$	0.996	0.0796	12.5
d	1		
Participantes	36	Draws	1000
Observaciones	219	AIC	2726.96
Log Likelihood	-1341.49	BIC	2801.43
Tiempo estimación	00:06:14		

Nota:

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

De aquí se puede observar que los resultados no son los esperados, ya que no se obtienen valores significativos al 95% para ninguna variable. Sin embargo, esto se podría explicar por ser esta una versión muy preliminar de la estimación, siendo la más simplificada y que además, se hace a partir de una base de datos con poca información por participante.

Aún cuando los parámetros no son significativos, se observan signos negativos en el nivel de CO₂, del ruido, del género (Género = 1 si es mujer) y del tiempo de viaje, lo cual tiene sentido en relación a las hipótesis expuestas anteriormente. Con respecto a los parámetros del Tipo de tramo, se observa que, de acuerdo a lo esperado, son decrecientes, es decir que los tramos de tipo 1 (Buenos) aportan de manera positiva a la utilidad y en mayor medida que los tramos tipo 2 (Medios) y 3 (Malos).

Finalmente, el único parámetro que resulta significativo (al 90 %) es el correspondiente a la temperatura superficial de la piel, corregido por el tiempo de viaje.

Esta versión del modelo es presentada en el Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, realizado del 23 al 25 de octubre de 2023, donde se reciben distintas preguntas y recomendaciones que se recogen para seguir avanzando en la modelación. Tomando en cuenta los comentarios recibidos, se abre paso al segundo modelo.

Modelo 2: Base de datos extendida

Luego, como se mencionó anteriormente en la sección 3.4.3 correspondiente a la confección de la base de datos, teniendo en cuenta que se pierden muchos datos al considerar sólo aquellos instantes en que existe emoción declarada, se agregan 3 instantes de interés, con el fin de tomar una representación más completa del viaje del participante. Los nuevos instantes son los siguientes:

1. Momento en que se registra un evento granular
2. Momento en que el participante pasa por una intersección
3. Cortes de tiempo cada un minuto por defecto

Agregando estos instantes de interés, la base de datos pasa a tener 1154 filas, lo que es un aumento considerable con respecto a la base de datos utilizada en el modelo 1, que tiene 219.

Es importante mencionar que, en todos los nuevos instantes que se agregan a la base de datos no existe emoción declarada, y una condición para que el código funcione de manera correcta, es que al menos una de las variables explicadas de las ecuaciones de medición (Valencia o Señal Biomonitor) tome algún valor. Entonces, para aquellos instantes en que no existe emoción declarada, se toma una probabilidad igual a 1, siempre que existan datos disponibles de las señales fisiológicas. Análogamente, es posible que existan instantes en que no hayan registros de las señales fisiológicas y en ese instante se toma una probabilidad igual a 1 y puede considerarse sólo si se registra una emoción, de lo contrario, no puede utilizarse para la modelación y se pierde la información de esa fila. Cabe destacar que la base de datos original, sin filtrar por cumplimiento de condiciones de existencia de señales, posee 1639 filas, es decir que se pierden 485, debido a que no cumplen la condición de poseer una señal declarada o las señales del Biomonitor.

Teniendo esto en consideración, el modelo 2 es la continuación del modelo 1, agregando los eventos granulares a las relaciones estructurales del entorno, y por otro lado las intersecciones

a las relaciones estructurales del viaje. Además, con respecto al tramo por el que transita el participante, se decide no clasificarlo como en el modelo 1, sino según las clasificaciones de la ruta mostradas en el capítulo 3, las cuales se prueban en distintas especificaciones que se presentan a continuación. De esta manera, los estimadores resultantes para cada tipo de infraestructura pueden interpretarse como su impacto marginal en las emociones y, por lo tanto, se usados para fines de diseño de política pública.

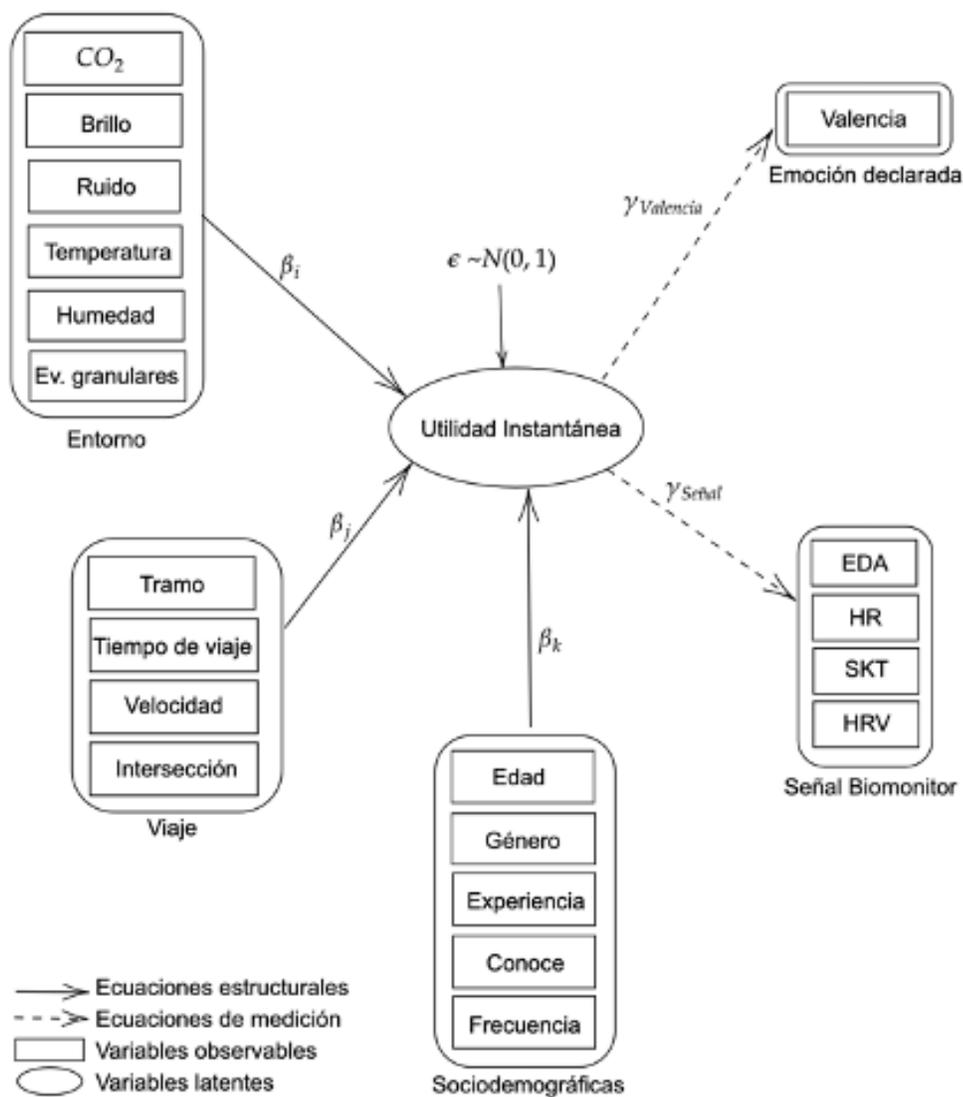


Figura 4.6: Marco Conceptual Modelo 2

Especificación 1: Clasificación de la ruta en tramos

La primera especificación, incluye toda la información descrita anteriormente, considerando la primera clasificación de la ruta: según sus tramos. Las ecuaciones de medición se mantienen iguales (para las 3 especificaciones siguientes), mientras que la ecuación estructural queda de la siguiente manera:

$$UI = \alpha_0 + \beta_C \cdot C + \beta_{eg} \cdot EG + \beta_{tw} \cdot tv + \beta_{vel} \cdot V + \beta_{t_i} \cdot T_i + \beta_{int} \cdot I + \beta_S \cdot S + \varepsilon \cdot d \quad (4.13)$$

Donde:

EG: Eventos Granulares

V: Velocidad

T_i : Tramo i , con $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 3v, 2v, 1v$.

I: Intersección

Observando los resultados presentados más adelante en la tabla 4.2, se obtiene que tanto el género, como la frecuencia de viaje en bicicleta, el parámetro que acompaña a la UI en la ecuación de medición del SKT y del EDA, son significativas (las primeras 3 variables al 95 % y la última al 99 %). La interpretación de estos resultados es interesante:

1. El género posee un signo negativo, lo que corrobora que las mujeres perciben la experiencia de peor manera que los hombres
2. La frecuencia de viaje en bicicleta posee un signo negativo y significativo, lo que se puede entender como que las personas que más andan en bicicleta, están más propensos a disminuir su utilidad durante el viaje ante distintos estímulos. Probablemente, un ciclista frecuente percibe de peor manera que un vehículo no respete las leyes del tránsito (porque lo vive más seguido, por ejemplo), a diferencia de alguien que sólo anduvo en bicicleta por el estudio
3. El EDA o GSR, posee un signo positivo, lo cual no es esperado según las hipótesis presentadas inicialmente, aunque es esperable que esta señal influya significativamente en la utilidad ya que está relacionada directamente con el estrés.

Analizando los parámetros asociados a los tramos, según la primera clasificación definida en la sección 3.5.2, se observa que ninguno de ellos resulta ser significativo, pero, analizando sus signos, se ve que todos los tramos presentan una mejoría con respecto al tramo 1, que, al ser una variable categórica, se utiliza como base. Estos resultados no son concluyentes y es necesario seguir experimentando con nuevas especificaciones que puedan acercarse mejor a los resultados esperados.

Los resultados de la modelación son los siguientes:

Tabla 4.2: Resultados Modelo 2, Especificación 1

Parámetro	Estimate	Robust s.e	Robust t-ratio (0)
α_0	-0.456	0.826	-0.551
β_{CO_2}	-0.00818	0.0327	-0.250
β_{brillo}	-0.0250	0.0265	-0.941
β_{ruido}	-0.0216	0.0482	-0.448
β_{temp}	0.0672	0.0726	0.926
β_{hum}	0.0406	0.0656	0.619
β_{eg}	-0.0659	0.0459	-1.43
β_{edad}	-0.00342	0.0433	-0.0788
β_{genero}	-0.575	0.265	-2.16**
β_{conoce}	0.108	0.199	0.540
β_{exp}	0.0414	0.0252	1.64*
β_{frec}	-0.0212	0.0103	-2.05**
β_{vel}	-0.00597	0.00521	-1.15
β_{tv}	3.55e-4	<.001	0.533
β_2	0.185	0.156	1.19
β_3	0.135	0.269	0.502
β_4	0.142	0.341	0.416
β_5	0.192	0.384	0.500
β_6	0.121	0.456	0.266
β_7	0.204	0.573	0.356
β_8	0.180	0.693	0.261
β_{3v}	0.207	0.738	0.280
β_{2v}	0.316	0.835	0.379
β_{1v}	0.162	0.973	0.166
$\beta_{intersecc}$	0.0134	0.0827	0.162
γ_{val}	1		
γ_{gsr}	0.931	0.194	4.79***
γ_{hr}	-0.0347	0.0425	-0.817
γ_{skt}	0.479	0.282	1.70**
γ_{hrv}	0.0124	0.327	0.0380
γ_{skt-t}	2.95e-5	<.001	0.478
γ_{vel}	<.001	0.00356	-0.286
$\eta_{med-valencia}$	0		
$\eta_{med-eda}$	0.686	0.0664	10.3
η_{med-hr}	1	0.0704	14.1
$\eta_{med-skt}$	0.926	0.111	8.31
$\eta_{med-hrv}$	0.999	0.109	9.13
d	1		

Tabla 4.3: Resultados Modelo 2, Especificación 1 (Continuación)

Participantes	37	Draws	1200
Observaciones	1154	AIC	12661.21
Log Likelihood	-6295.61	BIC	12837.94
Tiempo estimación	01:07:52		
<i>Nota:</i>	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01		

Especificación 2: Clasificación de la ruta adoptando la clasificación de infraestructura ciclista propuesta por Rossetti et al. (2018)

Luego, se prueba una especificación utilizando la clasificación de infraestructura ciclista propuesta por Rossetti et al. (2018), comentada anteriormente. La ecuación estructural queda como sigue:

$$UI = \alpha_0 + \beta_C \cdot C + \beta_{eg} \cdot EG + \beta_{tv} \cdot tv + \beta_{vel} \cdot V + \beta_{TTr_i} \cdot TTr_i + \beta_{int} \cdot I + \beta_S \cdot S + \varepsilon \cdot d \quad (4.14)$$

Donde:

EG: Eventos Granulares

V: Velocidad

TTr_i: Tipo Tramo i, donde i= (a), (b), (c), (d), (e).

I: Intersección

Observando los resultados de la tabla 4.4, se observa que el género, la experiencia, la frecuencia y el tiempo de viaje resultan ser significativos para la estimación de la UI del individuo. Por otra parte, para las ecuaciones de medición, tanto el GSR como el SKT resultan ser significativos para la estimación de sus respectivas señales. La interpretación de estos resultados es análoga a la de la especificación anterior.

Para este caso, β_B , β_C , β_D y β_E , son los parámetros correspondientes a los tipos de infraestructura (b), (c), (d) y (e) respectivamente, los cuales resultan ser no significativos. Analizando sus signos, se observa que todos los tipos de infraestructura son peores que el tipo (a), que, al ser una variable categórica, se comparan los resultados con respecto a ella: Sin infraestructura ciclista, es decir, ir por la calle.

Los resultados de la modelación son los siguientes:

Tabla 4.4: Resultados Modelo 2, Especificación 2

Parámetro	Estimate	Robust s.e	Robust t-ratio (0)
α_0	-0.390	0.417	-0.935
β_{CO_2}	-0.00627	0.0316	-0.198
β_{brillo}	-0.0233	0.0273	-0.854
β_{ruido}	-0.0194	0.0442	-0.438
β_{temp}	0.0541	0.0647	0.837
β_{hum}	0.0349	0.0643	0.543
β_{eg}	-0.0622	0.0471	-1.32
β_{genero}	-0.589	0.249	-2.37**
β_{conoce}	0.120	0.198	0.606
β_{exp}	0.0407	0.0193	2.10**
β_{frec}	-0.0213	0.0109	-1.95*
β_{vel}	-0.00594	0.00531	-1.11
β_{tv}	4.61e-4	<.001	2.60***
β_B	-0.0500	0.136	-0.365
β_C	-0.0391	0.114	-0.341
β_D	-0.0511	0.0918	-0.556
β_E	-0.0491	0.102	-0.481
β_{int}	0.0206	0.0822	0.251
γ_{val}	1		
γ_{gsr}	0.921	0.241	3.81***
γ_{hr}	-0.0296	0.0371	-0.796
γ_{skt}	0.479	0.277	1.73**
γ_{hrv}	0.00630	0.322	0.0195
γ_{skt-t}	2.88e-5	<.001	0.465
γ_{vel}	-0.00105	0.00366	-0.289
$\eta_{med-valencia}$	0		
$\eta_{med-eda}$	0.690	0.0666	10.3
η_{med-hr}	1.001	0.0706	14.1
$\eta_{med-skt}$	0.924	0.110	8.34
$\eta_{med-hrv}$	0.999	0.109	9.08
d	1		
Participantes	37	Draws	1200
Observaciones	1154	AIC	12653.5
Log Likelihood	-6298.75	BIC	12794.88
Tiempo estimación	00:43:22		

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

A pesar de que los resultados no sean significativos, es interesante que se desprenda esta conclusión, ya que va en contra de las hipótesis presentadas en el presente estudio y también, en contra de lo que se indica en la literatura. Esto puede tener diversas explicaciones: la

muestra escogida está mayormente representada por ciclistas frecuentes, quienes acostumbran a andar por la calle y que dadas las condiciones no estandarizadas de ciclovías en Chile, se prefiera ir por la calle. También, puede suceder que la configuración de la ecuación estructural no es la óptima y es necesario indagar más allá de una ecuación lineal.

Entonces, nuevamente la especificación no se ajusta a los valores esperados y es necesario seguir explorando en nuevas formas de clasificar la infraestructura.

Especificación 3: Clasificación de la ruta según sus características de infraestructura

Finalmente, se estima según la clasificación de la ruta según sus características, detalladas anteriormente en el capítulo 3. La ecuación estructural queda representada como sigue:

$$UI = \alpha_0 + \beta_C \cdot C + \beta_{eg} \cdot EG + \beta_{tv} \cdot tv + \beta_{vel} \cdot V + \beta_{caract_i} \cdot Caract_i + \beta_{int} \cdot I + \beta_S \cdot S + \varepsilon \cdot d \quad (4.15)$$

Donde:

EG: Eventos Granulares

V: Velocidad

Caract_i: Característica i, con i = Ancho de ciclovía, si es ciclovía, direccionalidad, sentido, etc.

I: Intersección

Para este caso en que se modela utilizando las características del tramo, se prueban distintas configuraciones para todas las características recolectadas, creando combinaciones que consideren algunas variables y otras no. En este contexto, se decide sacar del análisis las variables de la edad, el ancho de la ciclovía, la capacidad vehicular y la cantidad de estacionamientos de la calle. Lo anterior, debido a que en las pruebas iniciales de la presente especificación, no se obtuvieron resultados significativos para la mayoría de los parámetros estimados. Por esto, se decide iterar omitiendo una, dos o tres variables de la estimación para encontrar resultados más convenientes. En el caso del ancho de la ciclovía, que se creía que explicaba en gran medida la UI del individuo, resulta ser una variable poco significativa y se cree que es posible que exista correlación entre el ancho y si es ciclovía o parque/paseo.

Los resultados de la modelación son los siguientes:

Tabla 4.5: Resultados Modelo 2, Especificación 3

Parámetro	Estimate	Robust s.e	Robust t-ratio (0)
	Estimate	Rob.std.err.	Rob.t-ratio(0)
α_0	6.16	5.67	1.08
β_{CO_2}	-0.00591	0.0314	-0.188
β_{brillo}	-0.0240	0.0275	-0.871
β_{ruido}	-0.0179	0.0438	-0.409
β_{temp}	0.0583	0.0663	0.878
β_{hum}	0.0371	0.0644	0.577
β_{eg}	-0.0629	0.0486	-1.29
β_{genero}	-0.587	0.247	-2.37**
β_{conoce}	0.116	0.196	0.594
β_{exp}	0.0410	0.0195	2.09**
β_{frec}	-0.0214	0.0111	-1.92*
β_{vel}	-0.00612	0.00528	-1.15
β_{tv}	4.51e-4	<.001	2.50**
β_{calle}	-6.37	5.59	-1.13
β_{ciclo}	-6.55	5.61	-1.16
β_{bid}	-0.00113	0.00188	-0.606
$\beta_{sentido}$	-0.0648	0.0567	-1.14
$\beta_{intersecc}$	0.0229	0.0834	0.275
γ_{val}	1		
γ_{gsr}	0.920	0.248	3.69***
γ_{hr}	-0.0302	0.0366	-0.823
γ_{skt}	0.476	0.276	1.72*
γ_{hrv}	0.00682	0.320	0.0212
γ_{skt-t}	2.91e-5	<.001	0.472
γ_{vel}	-0.00107	0.00365	-0.293
$\eta_{med-val}$	0		
$\eta_{med-eda}$	0.689	0.0663	10.3
η_{med-hr}	1.001	0.0705	14.1
$\eta_{med-skt}$	0.925	0.111	8.33
$\eta_{med-hrv}$	0.999	0.109	9.09
d	1		
Participantes	37	Draws	1200
Observaciones	1154	AIC	12651.81
Log Likelihood	-6297.91	BIC	12793.19
Tiempo estimación	00:43:25		

Nota:

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Nuevamente, el género, la experiencia, la frecuencia y el tiempo de viaje resultan ser significativos, así como los parámetros del EDA y del SKT. Estos resultados no son tan concluyentes como se esperaría, pues realmente ninguna variable relativa a la infraestructura resulta ser significativa, lo cual es preocupante, ya que confirma que no se está utilizando la configuración de variables y parámetros de la mejor manera.

Si analizamos los signos de los parámetros de infraestructura, se observa que andar por ciclovia y por la calle aporta de manera negativa y en mayor cantidad a la utilidad que andar por un parque/paseo peatonal, que es la categoría sobre la cual se estiman estas dos variables estimadas. Además, la bidireccionalidad es peor evaluada que la unidireccionalidad, lo cual es un resultado interesante. Esto puede explicarse porque los participantes prefieren andar en una vía que sea exclusiva para ellos, sin que transiten ciclistas en sentido contrario.

4.2.4. Discusiones Modelación

De los resultados mostrados anteriormente, se puede ver que no se ha alcanzado la especificación óptima aún. No ha sido posible encontrar los factores de infraestructura que afectan en el estado psicofisiológico de las personas al andar en bicicleta.

Además, se observa que para las 3 especificaciones del modelo 2, donde se agrega el tiempo de viaje como una variable explicativa de la UI, su parámetro resulta ser significativo con signo positivo. Este signo es curioso, ya que se esperaría que a medida que el viaje es más largo, la Utilidad del usuario vaya disminuyendo, por el esfuerzo físico que este modo genera. Una posible respuesta, es que los participantes están en conocimiento de que esto es un experimento y quizás se sienten cada vez mejor porque sienten más confianza en lo que están haciendo. Es importante mencionar que varios participantes declararon estar nerviosos antes de comenzar por no querer estropear el estudio, esmerados en que saliera todo bien.

Otro punto importante, que es interesante seguir explorando, es que las variables del contextoINO, resultan no significativas en todos los modelos estimados. Esto, era posible que pasara, ya que estas medidas de contexto no siempre influyen de manera tan directa en la experiencia de un usuario. Se cree que es necesario estudiar estas señales en condiciones distintas a las de un estudio de caso, por ejemplo, viajes cotidianos de ciclistas.

Capítulo 5

Conclusión

En esta tesis fue posible cumplir el objetivo general que se propuso al inicio, de desarrollar y probar una metodología que relaciona los indicadores psicofisiológicos de un usuario con las características de su viaje en bicicleta. A través de un modelo de variables latentes, se ha modelado con éxito las relaciones causales entre los atributos de la experiencia en bicicleta y los indicadores psicofisiológicos experimentados durante el viaje. Aunque los resultados no mostraron una relación tan significativa como se esperaba, es un avance importante encontrar que la Utilidad Instantánea experimentada por un usuario al andar en bicicleta se ve afectada en alguna medida por las variables presentadas.

Esta tesis logra generar un aporte a las políticas públicas, ya que la metodología desarrollada y los resultados obtenidos ofrecen una nueva perspectiva para entender y mejorar la experiencia de ciclismo urbano, aunque el aporte no es tan influyente como se esperaba. El enfoque propuesto tiene el potencial de influir en el diseño y la implementación de infraestructuras ciclistas más eficientes y acogedoras para los usuarios.

La recolección de datos y la ejecución del experimento constituyen un aporte significativo, ya que a través de un diseño experimental meticuloso, esta tesis ha logrado capturar datos valiosos que reflejan la realidad vivencial de los usuarios de bicicletas en un contexto urbano. Este enfoque empírico permite una comprensión más profunda de las experiencias de ciclismo en la ciudad ya que conocer la perspectiva del usuario utilizando indicadores psicofisiológicos, ofrece una visión única sobre cómo los usuarios experimentan su entorno al andar en bicicleta. Este enfoque brinda *insights* valiosos que pueden ser cruciales para el diseño de políticas y la planificación urbana.

Como se comentó en el capítulo anterior, no fue posible corroborar las hipótesis que se tenían sobre cómo afectaría la infraestructura ciclista en las percepciones de los participantes, lo que no es un resultado positivo, pero motiva a seguir buscando el camino que refleje las intenciones iniciales del estudio.

Finalmente, este trabajo representa un paso significativo hacia poder encontrar la ciclovía que mejor responda a las necesidades de los ciclistas de las ciudades como Santiago, que es un punto controversial al día de hoy. Al acercarnos a comprender mejor las preferencias y experiencias de los usuarios, esta investigación abre caminos para desarrollar infraestructuras

ciclistas que no solo sean seguras y eficientes, sino también placenteras y acordes con las necesidades y expectativas de los ciclistas.

De cara al futuro, esta investigación sienta las bases para estudios más extensos y detallados que puedan utilizar esta metodología para explorar en profundidad los factores psicofisiológicos en diferentes contextos y con una variedad más amplia de usuarios. Esta línea de investigación tiene el potencial de contribuir significativamente a la creación de ciudades más sostenibles y amigables con el ciclismo, mejorando no solo la infraestructura física sino también la experiencia general de los ciclistas urbanos. Y más a grandes rasgos, también puede utilizarse esta orientación en más áreas que busquen entender el comportamiento humano.

Se espera continuar esta investigación con el fin de lograr buenos resultados en la modelación. Para esto, aún hay información disponible que se registró en el estudio de caso y que no fue utilizada. Un ejemplo de esto, son las encuestas de salud física y mental que respondieron los participantes del estudio. A continuación, se presenta un Marco conceptual que incluye esta información, incorporando los conceptos de Estado Basal Físico y Estado Basal Psicológico, los cuales pueden explicar señales fisiológicas y declaraciones de emociones, respectivamente, que entrega un participante a lo largo de su viaje.

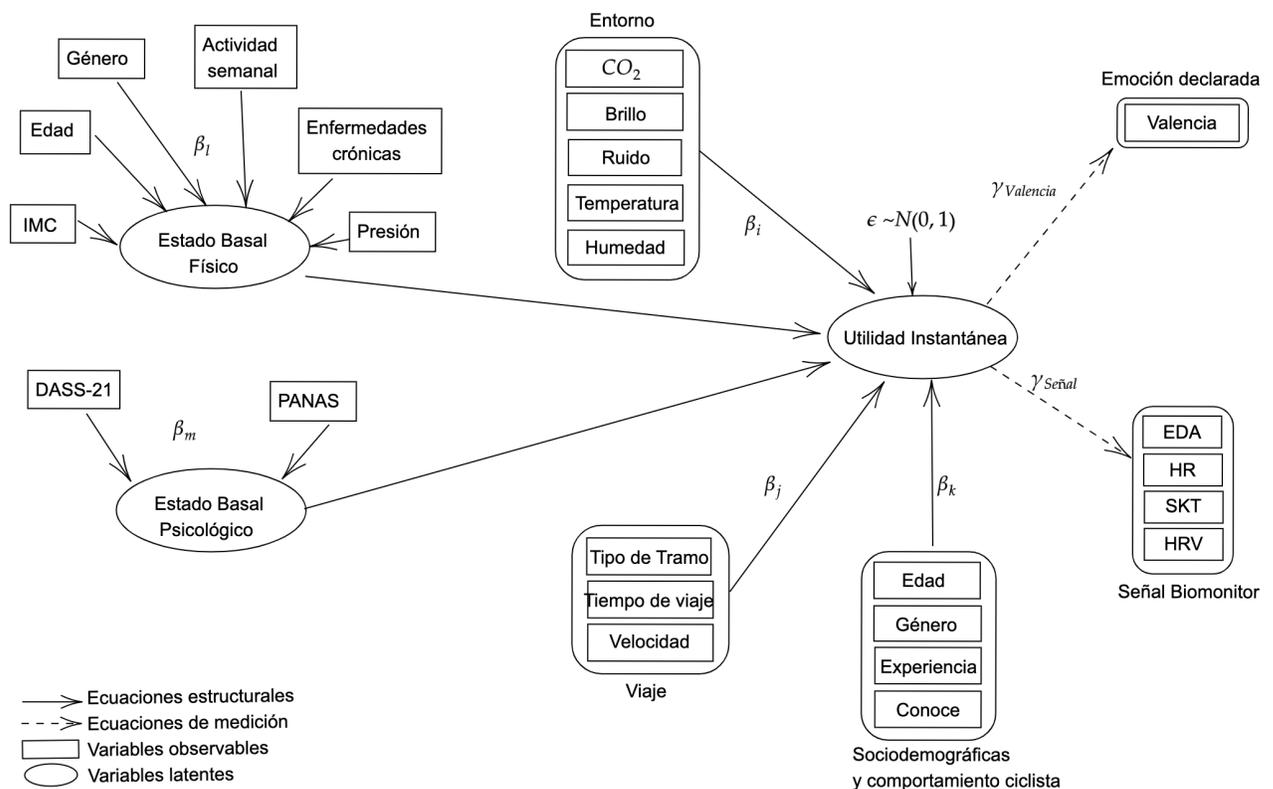


Figura 5.1: Marco conceptual Modelo futuro

Bibliografía

- Ayata, D., Yaslan, Y., and Kamaşak, M. (2017). Emotion recognition via galvanic skin response: Comparison of machine learning algorithms and feature extraction methods. *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 17(1):3147–3156.
- Barría, C. (2020). Propuesta metodológica y experimental para describir emociones percibidas en transporte público mediante indicadores psicofisiológicos. *Memoria de título, Universidad de Chile*.
- Barría, C., Guevara, C. A., Jimenez-Molina, A., and Seriani, S. (2023). Relating emotions, psychophysiological indicators and context in public transport trips: Case study and a joint framework for data collection and analysis. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 95:418–431.
- Ben-Akiva, M., Walker, J., Bernardino, A. T., Gopinath, D. A., Morikawa, T., and Polydoropoulou, A. (2002). Integration of choice and latent variable models. *Perpetual motion: Travel behaviour research opportunities and application challenges*, 2002:431–470.
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity*. Springer Science & Business Media.
- Bouscasse, H. (2018). Integrated choice and latent variable models: A literature review on mode choice. *Grenoble Applied Economics Laboratory (GAEL), Working paper (2018-07)*.
- Castro, M., Guevara, C. A., and Jimenez-Molina, A. (2020). A methodological framework to incorporate psychophysiological indicators into transportation modeling. *Transportation research part C: emerging technologies*, 118:102712.
- Caulfield, B., Brick, E., and McCarthy, O. T. (2012). Determining bicycle infrastructure preferences—a case study of dublin. *Transportation research part D: transport and environment*, 17(5):413–417.
- Caviedes, A. and Figliozzi, M. (2018). Modeling the impact of traffic conditions and bicycle facilities on cyclists’ on-road stress levels. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 58:488–499.
- Collet, C., Vernet-Maury, E., Delhomme, G., and Dittmar, A. (1997). Autonomic nervous system response patterns specificity to basic emotions. *Journal of the autonomic nervous system*, 62(1-2):45–57.
- Dennis, Jr., J. E. and Moré, J. J. (1977). Quasi-newton methods, motivation and theory. *SIAM Review*, 19(1):46–89.

- Echiburú, T., Muñoz, J. C., and Hurtubia, R. (2021). The role of perceived satisfaction and the built environment on the frequency of cycle-commuting. *Journal of transport and land use*, 14(1):171–196.
- Emond, C. R., Tang, W., and Handy, S. L. (2009). Explaining gender difference in bicycling behavior. *Transportation Research Record*, 2125(1):16–25.
- Fowles, D. C., Christie, M. J., Edelberg, R., Grings, W. W., Lykken, D. T., and Venables, P. H. (1981). Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, 18(3):232–239.
- Henríquez-Jara, B., Guevara, A., and Jimenez-Molina, A. (2023). Modelling experience-based choices and identifying instant utility (latent emotions) using psychophysiological indicators. *Available at SSRN 4454000*.
- Jänig, W. and McLachlan, E. M. (1992). Characteristics of function-specific pathways in the sympathetic nervous system. *Trends in neurosciences*, 15(12):475–481.
- Jimenez-Molina, A., Diaz-Guerra, F., Retamal, C., and Guevara, C. A. (2022). Towards psychophysiological markers for affect-aware vehicles. In *International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence*, pages 571–582. Springer.
- Jimenez-Molina, A., Retamal, C., and Lira, H. (2018). Using psychophysiological sensors to assess mental workload during web browsing. *Sensors*, 18(2):458.
- Kahneman, D., Wakker, P. P., and Sarin, R. (1997). Back to bentham? explorations of experienced utility. *The quarterly journal of economics*, 112(2):375–406.
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological psychology*, 84(3):394–421.
- Majumdar, B. B., Mitra, S., and Pareekh, P. (2015). Methodological framework to obtain key factors influencing choice of bicycle as a mode. *Transportation research record*, 2512(1):110–121.
- Márquez, L. and Soto, J. J. (2021). Integrating perceptions of safety and bicycle theft risk in the analysis of cycling infrastructure preferences. *Transportation research part A: policy and practice*, 150:285–301.
- McFadden, D. (1972). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior.
- Rossetti, T., Guevara, C. A., Galilea, P., and Hurtubia, R. (2018). Modeling safety as a perceptual latent variable to assess cycling infrastructure. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 111:252–265.
- Rossetti, T., Saud, V., and Hurtubia, R. (2019). I want to ride it where i like: Measuring design preferences in cycling infrastructure. *Transportation*, 46:697–718.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6):1161.

- Setz, C., Arnrich, B., Schumm, J., La Marca, R., Tröster, G., and Ehlert, U. (2009). Discriminating stress from cognitive load using a wearable eda device. *IEEE Transactions on information technology in biomedicine*, 14(2):410–417.
- Sharma, N. and Gedeon, T. (2012). Objective measures, sensors and computational techniques for stress recognition and classification: A survey. *Computer methods and programs in biomedicine*, 108(3):1287–1301.
- Sun, G. and Zacharias, J. (2017). Can bicycle relieve overcrowded metro? managing short-distance travel in beijing. *Sustainable cities and society*, 35:323–330.
- Teixeira, I. P., da Silva, A. N. R., Schwanen, T., Manzato, G. G., Dörrzapf, L., Zeile, P., Dekoninck, L., and Botteldooren, D. (2020). Does cycling infrastructure reduce stress biomarkers in commuting cyclists? a comparison of five european cities. *Journal of Transport Geography*, 88:102830.
- Ulrich-Lai, Y. M. and Herman, J. P. (2009). Neural regulation of endocrine and autonomic stress responses. *Nature reviews neuroscience*, 10(6):397–409.
- Wagner, R. E., Plácido da Silva, H., and Gramann, K. (2021). Validation of a low-cost electrocardiography (ecg) system for psychophysiological research. *Sensors*, 21(13):4485.
- Walker, J. and Ben-Akiva, M. (2002). Generalized random utility model. *Mathematical social sciences*, 43(3):303–343.