

DETERMINACIÓN DE PRESIONES ENTRE INDIVIDUOS EN AMBIENTES DE MUY ALTA DENSIDAD

Ayelen Santos ; Josefina Catoni

Laboratorio 7
Dept. de Física - FCEyN - UBA

Diciembre 2019

ALUMNAS:

Ayelen Santos - LU N°: 172/15 - E-mail: aye.csantos@gmail.com
Josefina Catoni - LU N°: 123/15 - E-mail: josefinacatoni@gmail.com

LUGAR DE TRABAJO:

Laboratorio de Física Estadística Computacional, Depto. de Física, FCEyN, UBA

DIRECTOR DEL TRABAJO:

Guillermo Frank - E-mail: guillermo.frank@gmail.com

CODIRECTOR DEL TRABAJO:

Claudio O. Dorso - E-mail: codorso@df.uba.ar

Guillermo Frank

Claudio O. Dorso

Ayelen Santos

Josefina Catoni

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos del trabajo	4
3. Preliminares	4
4. Dispositivo: Sensores y Chaleco	5
4.1. Caracterización de los sensores	5
4.2. Montaje del prototipo y disposición de los sensores	7
4.3. Calibración y testeo del dispositivo prototipo	8
4.4. Dispositivo y calibración final	11
5. Mediciones en transporte público	16
6. Experimento controlado en el laboratorio	22
7. Conclusiones	26
8. Reconocimientos	27
9. Apéndice	29

Resumen

En el presente trabajo se tuvo como **objeivo** identificar rangos y tipos de fuerzas a las que pueden estar sometidos individuos en ambientes de alta densidad. Para ello, se diseñó y construyó un dispositivo que **permite** detectar presión a través de sensores resistivos y almacenar estos datos de forma **pd**. Se obtuvieron una serie de resultados gracias a múltiples personas que lo utilizaron durante varios viajes en tren y subte con una gran cantidad de gente, representando así ambientes con muy alta densidad. **Se encontraron correspondencias entre lo apreciado por las personas al momento de las mediciones y los datos obtenidos por los sensores, encontrando intervalos de fuerzas incómodas de entre 10 a 30 N durante poco menos de 4 minutos para una persona, y de 5 a 20 N durante menos de 10 minutos para otra.** Se realizaron dos tipos de calibraciones sobre los sensores, una estática y otra dinámica, con el objetivo de obtener la relación más precisa para la fuerza ejercida y la lectura sobre cada sensor. Además se comparó entre distintos tipos de fuerzas dentro de las dinámicas. También realizó un experimento en un ambiente controlado con el objetivo de medir las fuerzas que se ejercen en una superficie cuya densidad vaya aumentando, variando la cantidad de gente y la posición en la que se encuentra la o las personas que miden.

1. Introducción

Es de público conocimiento que en grandes eventos donde suceden catástrofes, lamentablemente muchas personas sufren lesiones graves, e incluso la muerte. Se conoce de muchos grupos de investigación que a través de distintos modelos, como lo es el de la *fuerza social*[1], simulan situaciones en las que se representan este tipo de eventos en diversas configuraciones[2-6]. Este modelo toma como **parámetros necesarios las presiones** que se ejercen entre los cuerpos y otros que dependen **dell**as. Un defecto que se tiene en esta línea de investigación es que no se encuentran datos disponibles concretos sobre estos eventos por fuera de las imágenes en videos. Incluso consultando trabajos publicados, se encontró un resultado reportado en China[7] y otros pocos trabajos similares. **Dado que los parámetros del modelo no se fijan bajo criterios observacionales basados en las experiencias en ambientes de alta densidad, se encuentra sumamente importante estudiar las presiones que se ejercen en estas condiciones. Para ello es necesario conocer qué rango de presión es el de interés según las que se encuentren en este tipo de situaciones.** A través de una investigación previa[5], se encontró que una presión de aproximadamente 800 g/cm^2 es considerada como molesta si es ejercida sobre la zona del pecho y espalda. **Por lo cual se pretende obtener fuerzas en el orden de ese valor.**

Otro parámetro estudiado como relevante para el modelo de fuerza social es un tiempo característico de relajación τ , que corresponde a cómo afectan estas variaciones en presión sobre el cuerpo humano. Se toma como τ un valor cercano a los 0,5 **seg**, es por esto que se pretende que las mediciones tenga una frecuencia de muestreo de al menos el doble: 4 mediciones por segundo.

2. Objetivos del trabajo

En este trabajo se tuvo como objetivo en primer lugar, identificar rangos y tipos de presiones a las que pueden estar sometidos los individuos en ambientes de alta densidad. Para ello se estudió y caracterizó los sensores de presión que mejor se adaptaran a esas condiciones.

El siguiente objetivo, fue diseñar y armar un dispositivo de medición de presiones en tiempo real. Un dispositivo programable de tal modo que lea y almacene los datos de cada sensor de fuerza. **Estacamos que este dispositivo además debió ser portátil y de costo razonable.** Finalmente, luego de realizar pruebas con el dispositivo armado, se tuvo como objetivo tomar mediciones, en ambientes públicos concretos de muy alta densidad (subtes, tren, colectivos, etc.). A partir de los datos recolectados, se buscó identificar niveles de “incomodidad”, “desagrado” y hasta “de riesgo” para peatones.

3. Preliminares

En un principio se dispuso de diferentes sensores para poder estudiarlos y determinar cuál sería el que mejor se adecúe a los objetivos. Primero, **por una conveniencia económica**, se analizaron unos piezoeléctricos obteniendo su curva de resonancia y caracterizando su respuesta ante distintos estímulos. A pesar de la ventaja del bajo costo de éstos, este modelo no resultó conveniente ya que las lecturas que se obtuvieron no reflejaban fielmente las fuerzas ejercidas. **Esto puede ser causado por las propias características físicas que modelan su comportamiento.** Es por esto que este tipo de sensores fue descartado.

En segundo lugar, se estudiaron dos sensores de carácter resistivo de diferentes tamaños. Se comenzó por un sensor cuadrado y se señaló que la respuesta del mismo variaba significativamente según la zona en la cual la fuerza era ejercida. Por otro lado también se destacó que éste y un sensor redondo sufren de una gran variabilidad cuando sienten presiones de la misma magnitud. Por este motivo, en una primer instancia, se optó por tomar los sensores redondos por tener una superficie menor, ya que los cuadrados proporcionarían mayor incertezza de los datos por el tamaño de la suya. En una instancia posterior, luego de tener que descartar varios de los sensores redondos, se tuvo que recurrir al uso de los sensores cuadrados para no perder zonas del cuerpo a sensar. Esto conllevó un estudio mucho más amplio de estos sensores dado su comportamiento, que a su vez también impactó al tipo de caracterización de los sensores redondos.

Otro factor a destacar es el funcionamiento de la placa Arduino, ya que se recurrió a una amplia bibliografía para poder comprender el funcionamiento y la programación de la misma para un eficiente uso junto con el resto de las componentes.

4. Dispositivo: Sensores y Chaleco

4.1. Caracterización de los sensores

Para el armado del dispositivo se utilizaron sensores de carácter resistivo *Tactilus Free Form Sensor* [9]. Se contó con dos geometrías distintas; unos circulares (diámetro de 19mm) y otros cuadrados (40mm de largo), como se aprecian en la figura 1. Se tuvo la precaución de aprovechar la máxima superficie disponible del sensor para realizar las mediciones, utilizando un soporte de goma que distribuya las presiones de forma homogénea sobre la misma. Esto se hizo ya que previamente se observó que la respuesta del sensor para distintas posiciones de la presión ejercida es significativamente variable. Además de diferir en su tamaño, los rangos presión que ambos soportan son significativamente diferentes: el primero puede llegar hasta unos 14 kgf cm^{-2} y el segundo hasta unos $3,5 \text{ kgf cm}^{-2}$.

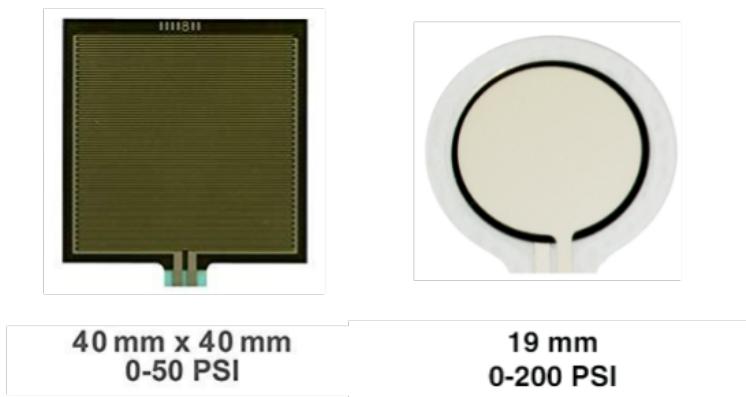


Figura 1: Sensores *Tactilus Free Form Sensors* utilizados para medir fuerza.

El análisis de comportamiento y la calibración de los sensores se realizó usando un circuito como el que muestra la figura 2. Cada sensor se alimentó con una fuente continua de 5V, y se conectó en serie con una resistencia R_{aux} sobre la cual se midió la tensión a través de un canal

de lectura analógico. El valor de la resistencia auxiliar fue cuidadosamente elegido para cada sensor de manera de aprovechar al máximo el rango de fuerzas que se esperaba medir, dada la no linealidad en la respuesta de los sensores [8]. La caracterización de la respuesta del sensor en función del valor de R_{aux} se muestra en la sección 4.4. Sin realizar fuerza sobre los sensores, estos tienen una resistencia propia en el orden de los $M\Omega$.

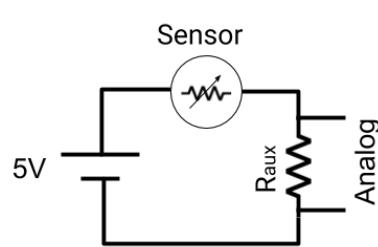


Figura 2: Circuito montado para estudiar el comportamiento de los sensores.

En primer lugar, se comenzó por estudiar el tiempo de relajación de los sensores, es decir, el tiempo que tarda en volver al equilibrio el sistema, cuando se tiene una fuerza constante y se la deja de aplicar en un dado instante. Para ello, se colocaron distintas masas, que generen una fuerza constante durante cierto tiempo, sobre los sensores y se los quitó, registrando para todo tiempo cuál era la lectura sobre R_{aux} . En la figura 3 se ilustran los resultados para el caso de uno de los sensores cuadrados. Se ajustó la señal por una función exponencial decreciente para estimar el tiempo de relajación característico. Se pudo apreciar que para fuerzas bajas (en el orden de los 5N) se obtuvo respuesta ‘instantánea’ del sensor, es decir τ nulo, por lo que no se realizó ningún ajuste. Se puede observar en los dos últimos gráficos que para fuerzas grandes el sensor demorará más de 40 seg en volver al estado inicial, teniendo en ambos casos respectivamente un $\tau = (6,9 \pm 0,3)$ s y $\tau = (8,9 \pm 0,2)$ s por efectos capacitivos.

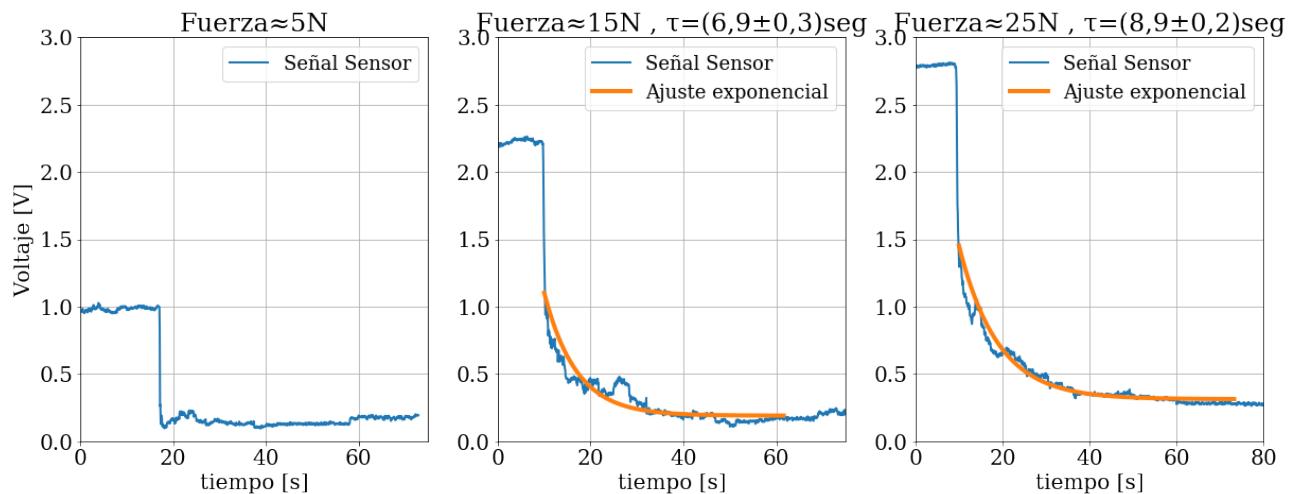


Figura 3: Tiempo de relajación de un sensor cuadrado para distintos valores de fuerza aplicados sobre éste.

En el caso del sensor circular, se detectó respuesta ‘instantánea’ del sensor para todos los rangos de fuerzas. En la figura 4 se grafica la señal para una fuerza en el orden de 25N. Esto es un factor muy positivo a la hora de considerar qué sensor resultará más conveniente para el tipo de mediciones que se propone llevar a cabo, y es por esto entre otros que se decidió optar por éstos prioritariamente para el diseño del dispositivo.

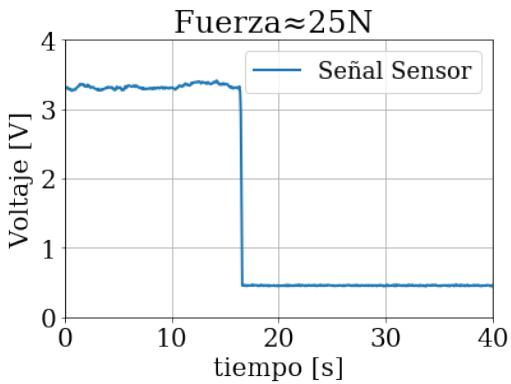


Figura 4: Tiempo de relajación de un sensor circular para una fuerza de 25N aplicada sobre éste.

Además de un tiempo de relajación apreciable, se distinguió en los sensores cuadrados la aparición de efectos de histéresis al realizar fuerzas dependientes del tiempo (ver sección 4.4). Por esto, y sumado a la gran variabilidad en la respuesta según la zona del sensor que se tocara, se optó por utilizar los sensores circulares para montar el dispositivo de medición. Sólo se recurrió a los sensores cuadrados cuando se superó la vida útil de los circulares, y no se deseaba perder zonas del cuerpo sobre las cuales medir.

La calibración se detallará en las secciones 4.3 y 4.4.

4.2. Montaje del prototipo y disposición de los sensores

El circuito utilizado para medir fuerzas con los sensores se muestra en la Fig. 5. Con las resistencias disponibles en el laboratorio, se seleccionó la de $(799 \pm 1) k\Omega$ como la más conveniente para la lectura de voltaje. Dada la no linealidad en la respuesta de los sensores ante fuerza, el valor de estas resistencias determina para qué rango de fuerzas la señal comienza a comportarse de forma asintótica hacia un valor de tensión máxima de 5V [6].

Para medir el voltaje V que cae sobre la resistencia R_{aux} y para alimentar el circuito con un voltaje V_0 de un valor de 5V se utilizó una placa Arduino Mega 2560. Las lecturas de la placa en sus canales analógicos recorren el intervalo 0-5V de manera discreta entre 0 y 1023; es por eso que de aquí en adelante, cada vez que se grafiquen o mencionen lecturas se estará haciendo referencia a esto.

Para el montaje del dispositivo, se utilizaron 3 sensores circulares conectados como muestra la Fig. 5 y dispuestos sobre un chaleco fabricado para el experimento como muestra la Fig. 6. Se cubrieron los sensores con la misma goma que se utilizó para la caracterización y, como sólo se disponía de 3 de ellos, se los adhirió al chaleco con velcro y cinta bifaz para hacer mejor provecho de ellos y moverlos fácilmente de ser necesario.

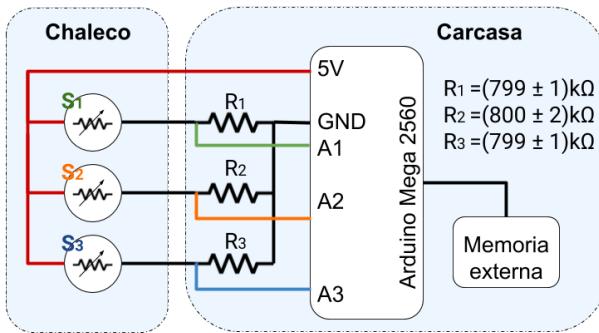


Figura 5: Circuito utilizado para medir el voltaje que produce uno o más sensores de fuerza *Tactilus*.

Para **almacenar** los datos que fueran a medirse, se armó un dispositivo electrónico portátil capaz de **almacenar** en una memoria externa toda la experiencia. A su vez, se colocaron interruptores para controlar en qué momento se deseaba comenzar o finalizar el registro de datos. Otros componentes del dispositivo fueron diseñados y ensamblados con una impresora 3D.

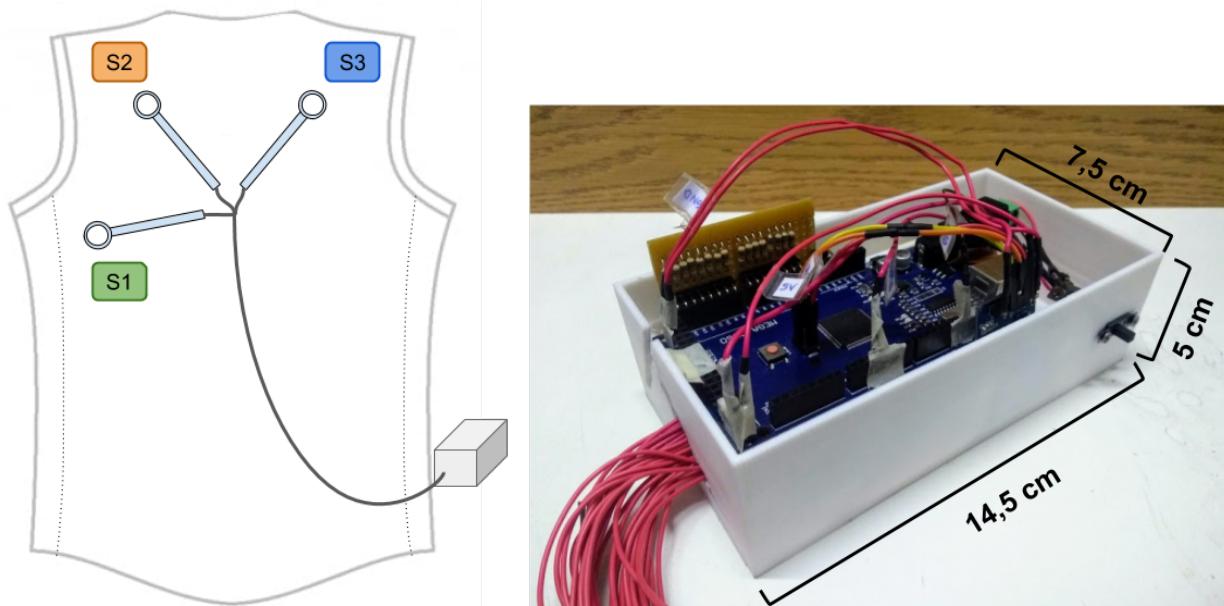


Figura 6: A la izquierda, esquema del chaleco diseñado para realizar las mediciones con la presente disposición de los tres sensores de presión sobre la parte superior de la espalda. A la derecha la carcasa portátil conteniendo los componentes electrónicos del chaleco con sus dimensiones. La carcasa además tiene una tapa de 5 cm de altura.

4.3. Calibración y testeo del dispositivo prototipo

La variable de interés que se quiere cuantificar es la fuerza sobre una determinada superficie, sobre la cual se pudiera colocar el sensor. Para esto, se procedió a estudiar la respuesta del sensor ante distintos estímulos de fuerzas, variando la intensidad y longitud temporal de estos estímulos.

Primero, se realizó una calibración estática, que consistió en acumular pesos conocidos sobre el sensor de forma creciente, registrando qué valores de voltaje se obtienen **para cada una**, como



se ve en la figura 7. La ventaja de este método es que se conoce con mucha precisión la fuerza que se ejerce sobre el sensor. Sin embargo, el diámetro tan pequeño del sensor dificultaba que las masas quedaran equilibradas sobre éste; con lo que no se pudo lograr el rango de fuerzas deseado. Asimismo, se observó que los sensores presentaban una gran variabilidad al colocar una y otra vez la misma masa; la respuesta variaba en hasta 1V, lo que equivale a un 20 % del rango total de voltajes que se pueden medir. Se eligió calibrar sobre una superficie blanda dado que los fabricantes así lo recomiendan [9]. Es por esto que se utilizó una plancha de telgopor como base de los mismos.

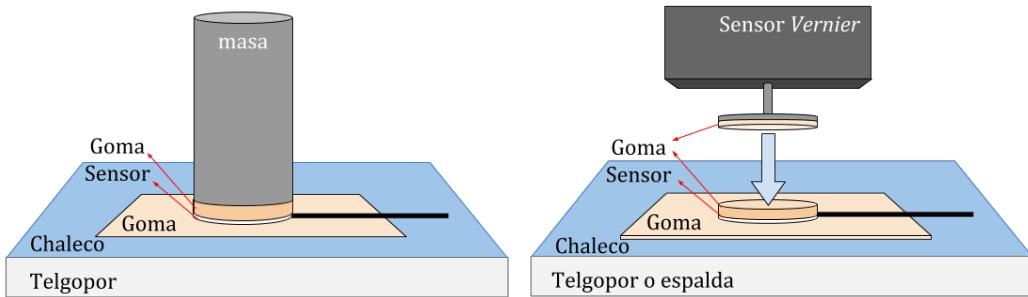


Figura 7: A la izquierda, disposición experimental utilizada para calibrar el prototipo mediante un método estático. A la derecha la disposición experimental utilizada mediante un método dinámico

En segundo lugar, con el fin de aumentar el rango de presiones posibles, se utilizó un método de calibración dinámico. Para ello se usó un sensor de fuerza Vernier: *Dual Range Force Sensor* [10]. Por el principio de acción y reacción, si se presiona perpendicularmente el sensor *Tactilus* con la punta del *Vernier*, ambos sensores sentirían la misma fuerza, con lo que dada la lectura del *Vernier* se podría calibrar el Sensor *Tactilus* (ver figura 7). Se realizaron distintas mediciones sobre cada uno de los tres sensores, variando la intensidad y duración de la fuerza. Se realizó también esta experiencia colocando los sensores sobre telgopor y luego sobre la espalda de una persona recostada.

A partir de los distintos métodos de calibración, en la figura 8 a la izquierda se muestran los resultados obtenidos para un mismo sensor de las formas dinámica y estática, en color azul y rojo respectivamente. Se puede observar que la dispersión obtenida para cada fuerza en las mediciones estáticas es mayor a la dinámica, en algunos casos incluso superándolas en un 50 %. En cambio, los resultados para la medición dinámica no sólo representan menor variabilidad, sino que permiten un mayor rango de fuerzas.

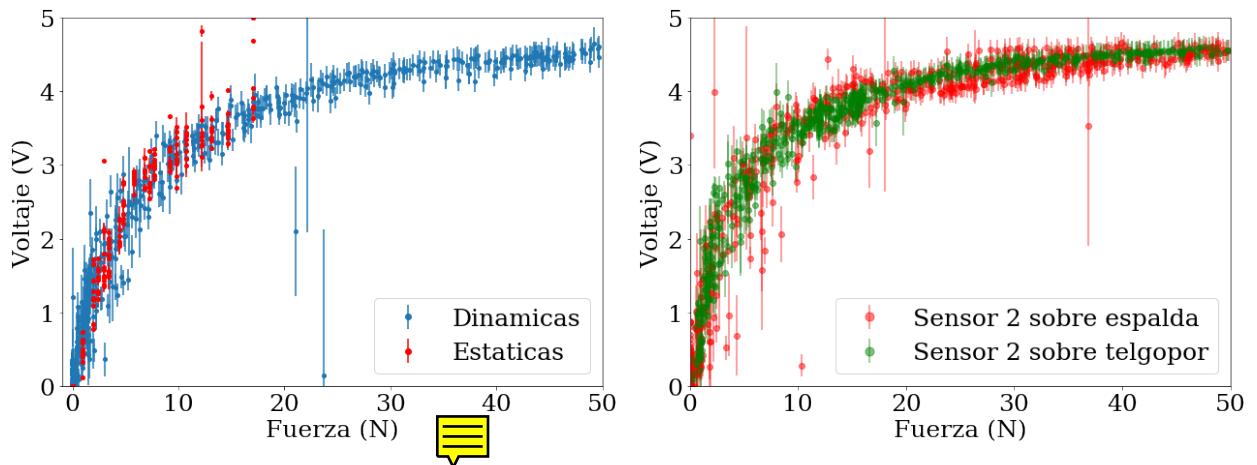


Figura 8: A la izquierda voltaje medido con el dispositivo sobre un sensor para fuerzas estáticas y dinámicas. A la derecha, voltaje medido sobre telgopor y sobre la espalda. Se observa que ambas respuestas son similares, independientemente de la superficie en la cual la fuerza fue ejercida.



En la figura 8 también se graficó la curva de calibración para uno de los sensores, habiendo sido puesto sobre dos superficies distintas: telgopor, y la espalda de una persona recostada. Se observó que la respuesta no cambia según la superficie de contacto. Sin embargo, cada sensor se comportó de manera única, lo que hizo a este resultado de gran valor; ya que significó que al comprar más sensores, se debería caracterizar cada uno individualmente. Se encontró gran semejanza de las curvas de calibración con otras reportadas para los mismos sensores por otro grupo [11].

Una vez montado todo el dispositivo prototipo, que contaba con 3 sensores circulares, se realizaron mediciones de prueba en transporte público con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de éste. Además, estos resultados preliminares fueron útiles para tener un panorama de qué zonas del cuerpo sienten mayor presión y en función de eso poder plantear las modificaciones necesarias del prototipo. El sujeto de prueba llevó consigo una bitácora de las sensaciones que estaba viviendo en cada una de las experiencias, ver ejemplo en la figura 9 de un viaje en el Tren Sarmiento. Esto sirvió para determinar el grado de incomodidad frente a distintos rangos de presiones. Los sensores se colocaron como muestra la figura 6.

17:48	Lo prendí aproximadamente, puse a medir y lo corté porque no me subí al tren.
18:00	Lo puse a medir de nuevo porque viene el tren.
18:02	Entré empujando con la espalda.
18:04	Oscilaciones. Siento más presión del lado derecho. Ramos presión lado izquierdo.
18:12	Menos presión general.
18:15	Salió de Haedo, no hay mucha presión. Un poco de presión suave abajo a la derecha.
18:20	En Morón hubo un contacto en el brazo izquierdo
18:21	Un poco de presión en la espalda media
18:22	Más presión lado izquierdo
18:28	Corté el cronómetro y paré de medir. Lo hice después de bajar del tren y pasar por el molinete
18:39	Llegué a casa, la luz titila, o sea en algún momento del camino se activó el interruptor.
18:40	Dejé de medir y luego lo apagué.

Figura 9: Ejemplo de bitácora realizada por el voluntario durante una medición en el Tren Sarmiento.

Tras analizar estas mediciones, se halló que los hombros y espalda (parte media y superior) eran las zonas que recibían la principal componente de fuerzas a lo largo del viaje. Además, estas son las zonas relevantes en donde se podría sufrir lesiones e incluso asfixia.

También se notó que las resistencias auxiliares elegidas habían sido algo elevadas, por lo que se decidió estudiar profundamente qué valor de resistencia convenía tomar.

Otro resultado fundamental surgió al analizar las mediciones preliminares. Inicialmente, se optó por realizar un ajuste de las mediciones dinámicas (Figura 8), y para ello se tomó una función que no sólo fuera monótonamente creciente, sino que además fuera fácil de invertir (ya que en los futuros experimentos se querría predecir la fuerza a partir de la lectura sobre el sensor). Para ello se tomó una función exponencial. Sin embargo, dada la naturaleza asintótica de la función que se eligió, se notó que si se superaba un cierto umbral en la lectura, la fuerza que predecía este ajuste no representaba un valor confiable. Es decir, para una lectura mayor a 4,5V, la fuerza que predecía el ajuste se hacía infinitamente grande, lo cual no correspondía con la fuerza real que se ejercía sobre el sensor. Cabe destacar que este inconveniente surgió al analizar las primeras mediciones en transporte. En un principio, con los primeros resultados de prueba, no se había llegado a valores de lectura tan altos como para generar este problema.

Es por esto, que para el dispositivo final se tomó otra función para ajustar los datos de la calibración, como se detallará en la sección 4.4, de manera de tener una mejor estimación de fuerzas en el rango alto.

4.4. Dispositivo y calibración final

Contando con una cantidad total de 16 sensores circulares y 3 cuadrados, se procedió a confeccionar el dispositivo final. Dado que la placa Arduino contaba con 16 canales analógicos, este fue el número máximo de sensores con el que se pudo medir simultáneamente.



En la figura 10 puede verse una foto del chaleco. Se cubrió la superficie con velcro, ya que se verificó que era la manera más práctica de fijar los sensores para una dada medición, pero con la libertad de poder cambiarlos de lugar de ser necesario.



Figura 10: Dispositivo final de medición.



Se conectaron, al igual que antes, los 16 sensores a la placa Arduino como muestra la figura 12. Para determinar el valor de la resistencia auxiliar más conveniente, se hizo una experiencia que consistió en tomar algunos valores para ésta, y estudiar el comportamiento del sensor ante fuerzas utilizando el método de calibración dinámica.

En la figura 11 se grafica la lectura de tensión sobre la resistencia auxiliar, en función de la fuerza que se aplicara sobre el sensor. Se puede apreciar que para resistencias bajas entre $20 - 60k\Omega$, la respuesta es lineal con la fuerza. Sin embargo, se desaprovecha el rango de 0-5V, por lo que al leer con un canal analógico de 0 a 1023 unidades discretas, se perdería definición en la lectura. Por otro lado, para resistencias altas como la de $820k\Omega$, aprovechan todo el rango de lectura de 0-5V, pero la señal satura para fuerzas mayores a 10N; por lo que una resistencia ideal debería encontrarse en un rango intermedio.

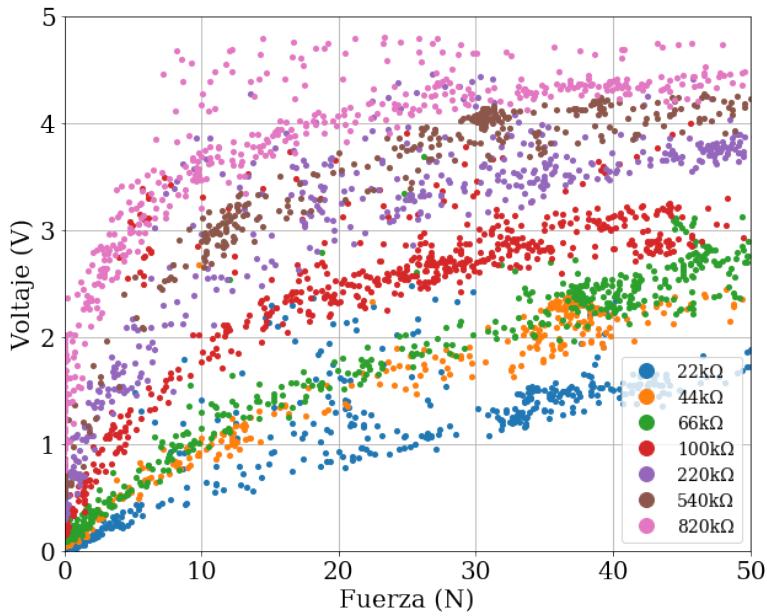


Figura 11: Circuito utilizado para medir fuerza sobre los sensores *Tactilus*.

De esta forma al conocerse estas variaciones según la resistencia, las R_{aux} que se fijaron fueron en el orden de $R = 560\text{k}\Omega$ para los sensores circulares, y de $R = 68\text{k}\Omega$ para los cuadrados (ver Apéndice).

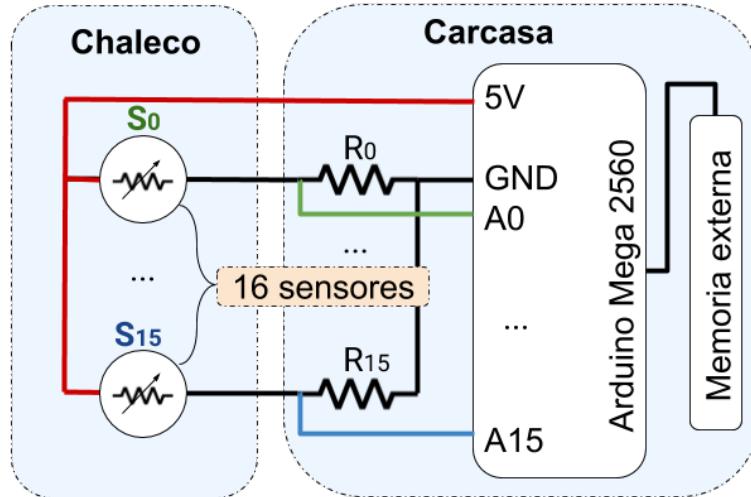


Figura 12: Circuito utilizado para medir fuerza sobre los sensores *Tactilus*.



Luego, se procedió a calibrar todos los sensores con su correspondiente resistencia. Para ello, se los puso sobre el chaleco ya que sería la superficie sobre la cual se mediría de ahí en adelante. Se utilizó el método dinámico por las ventajas que presenta el mismo. Para cada sensor, se calibró haciendo dos tipos de estímulos de fuerza sobre el sensor. El primero consistía en aumento progresivo de la fuerza, y luego hacerla disminuir, de manera que se variara el rango de 0 a 50 N en medias de 2 minutos de duración. El segundo tipo de estímulo fue de “golpes” o fuerzas de corta duración temporal y de distintas intensidades, al que se denominó ‘Calibración bis’. Este método se agregó posterior a las mediciones preliminares, ya que se vió que la señal medida correspondía en la mayoría de los casos a golpes de este tipo. A modo de exemplificación, se muestra ambos tipos de fuerzas aplicadas sobre un sensor en la figura 13

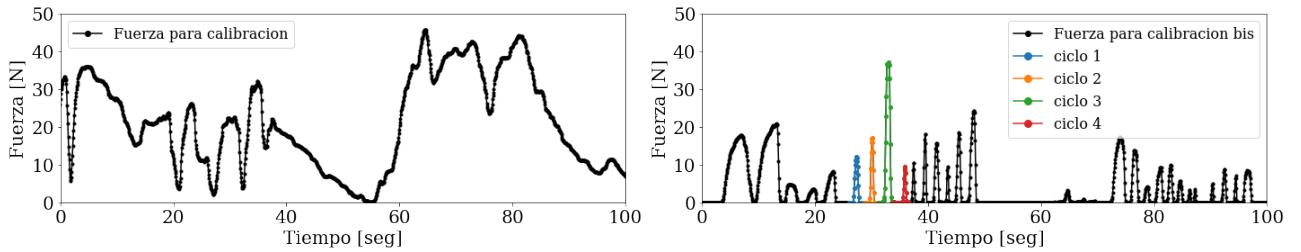


Figura 13: Fuerza realizada sobre uno de los sensores para su calibración por 2 métodos dinámicos. Los ciclos destacados se usaron para estudiar el comportamiento de histéresis de los sensores cuadrados.

Para ajustar los datos, a diferencia de la calibración previa en la sección 4.3 donde se propuso una función exponencial, se tomó una función logarítmica:

$$y = a + b \ln(x - c) \Leftrightarrow x = c + e^{\frac{y-a}{b}}$$

ya que cumplía con los requisitos de ser monótonamente creciente, fácil de invertir, y tiene la ventaja de no tener un comportamiento asintótico para lecturas en el orden de las 800 unidades como sí lo representaba la función exponencial antes propuesta. En las figuras 14 y 15 se graficaron a modo de exemplificación la respuesta de uno de los sensores circulares y cuadrados respectivamente junto con el ajuste correspondiente y su intervalo de confianza para la calibración bis.

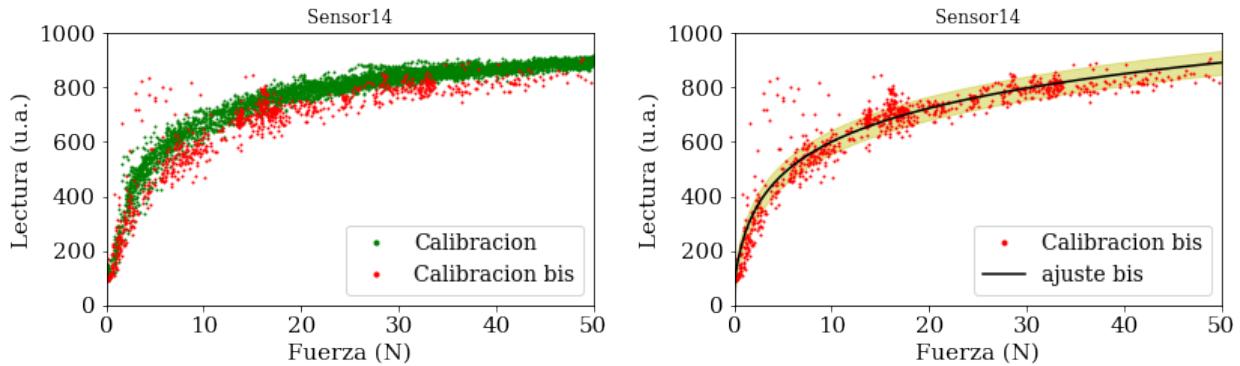


Figura 14: A la izquierda, gráfico correspondiente a las curvas de calibración de uno de los sensores circulares. A la **izquierda** el ajuste y cinturón de confianza correspondiente al método de calibración bis.



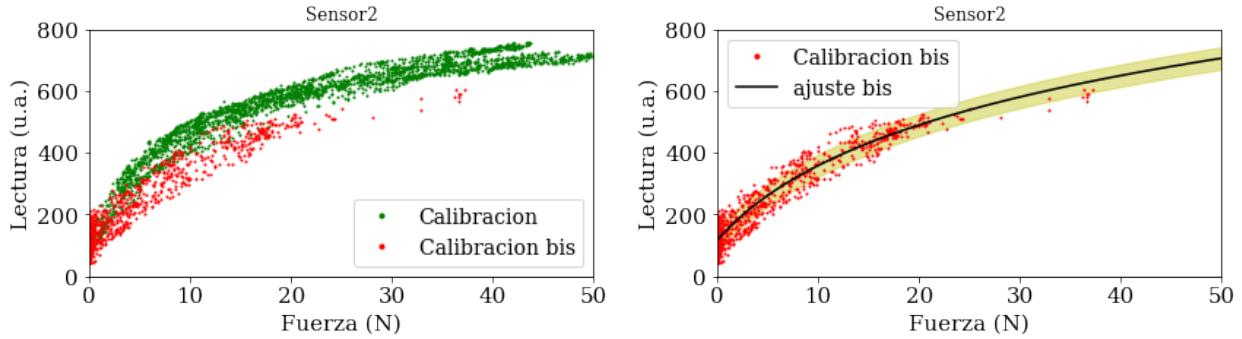


Figura 15: A la izquierda, gráfico correspondiente a las curvas de calibración de uno de los sensores cuadrados. A la **izquierda** el ajuste y cinturón de confianza correspondiente al método de calibración bis.

Se optó, para todos los sensores, ajustar los datos de la calibración bis, ya que era más representativo del tipo de fuerzas que se registran en los transportes y demás experiencias **reales**. Únicamente para 4 de los sensores circulares se utilizó la calibración original ya que tuvieron un desgaste acelerado, y no llegaron a ser usados para el tiempo en el que se incorporó el tipo de calibración bis (**Ver** el apéndice para mayor detalle en los ajustes).

Como se puede apreciar en la figura 16 (que corresponde a la misma calibración del sensor de la figura 14, pero en escala logarítmica), este nuevo ajuste es capaz de predecir correctamente los valores de fuerza altos.

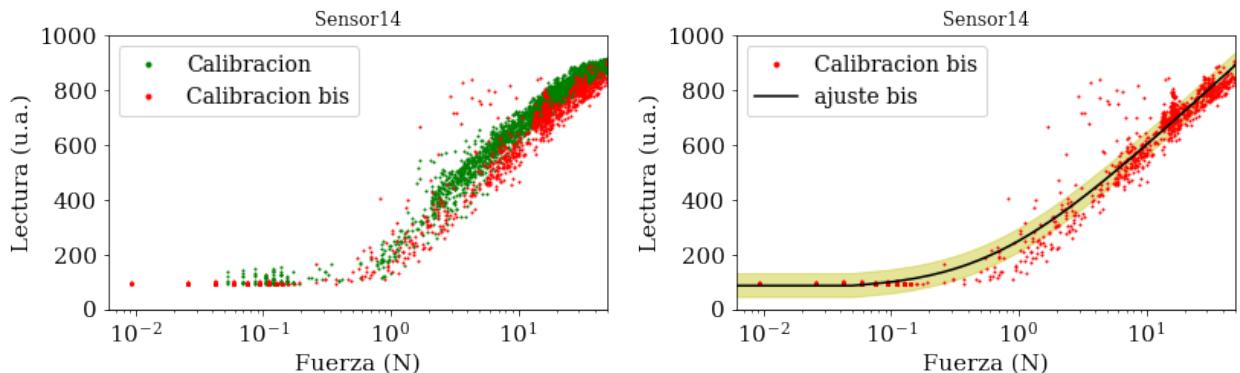


Figura 16: A la izquierda, gráfico correspondiente a las curvas de calibración de uno de los sensores circulares en escala horizontal logarítmica. A la **izquierda** el ajuste y cinturón de confianza correspondiente al método de calibración bis.

Además, para el caso de los sensores cuadrados, se detectó un comportamiento con histéresis. En la figura 17, se graficó la respuesta del sensor para 4 ciclos de subida y bajada de fuerza de la Calibración Bis. Los ciclos seleccionados se destacan en el mismo color en la figura 13.

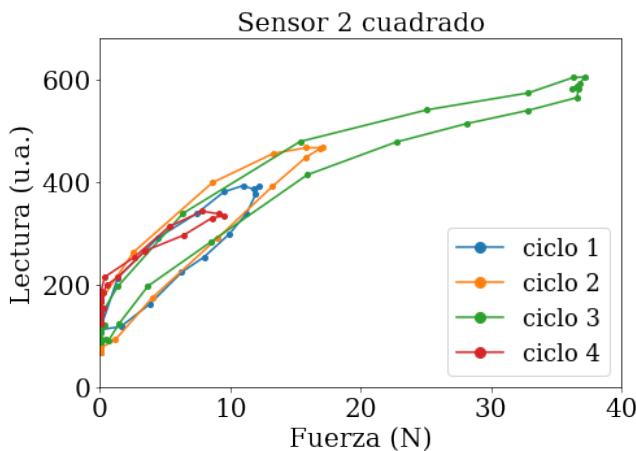


Figura 17: Curvas de histéresis de uno de los sensores cuadrados.

Si bien este comportamiento puede afectar al momento de predecir las fuerzas según la lectura de estos sensores, este aporte fue contemplado en la incertezas asociada a la predicción por los ajustes realizados.

5. Mediciones en transporte público

Una vez completado el armado y calibración del chaleco, se procedió a realizar mediciones de campo en escenarios de muy alta presión, como trenes y subterráneos en la ciudad de Buenos Aires y conurbano. Cada experiencia consistió en un sujeto que llevó puesto el dispositivo debidamente cubierto para que los sensores no sufrieran lesiones, para que sea algo disimulado para no levantar sospechas y evitar inconvenientes, y de esta forma no se modifique el comportamiento de los demás pasajeros. Se inició la medición unos segundos antes de subir al transporte y se finalizó al bajarse del mismo. El sujeto llevó consigo un cronómetro en el cual se registró el paso de las estaciones, y en una bitácora anotó sensaciones de incomodidad a lo largo del viaje.

Por otro lado, se optó por un método de sincronización entre los datos y el cronómetro que consistió en tocar uno de los sensores en el pecho y a su vez marcar ese tiempo en el cronómetro. Esto se hizo dado que en la mediciones de prueba se notó que los tiempos que registra la placa Arduino no coinciden con los del cronómetro al mirar el inicio y el fin de las mediciones. Se tuvieron en cuenta todas estas correcciones en los tiempos al hacer el análisis de los datos.

Se repitió la experiencia, variando la persona que llevaba el dispositivo, el medio de transporte y el horario de viaje. En el cuadro 1 se muestran los detalles del transporte, fecha, hora y las personas que fueron a medir. En la figura 18 se ilustra un esquema de la disposición de los sensores sobre el chaleco para una de las mediciones. También se delimitan las zonas del cuerpo que se analizarán: espalda central, hombro y espalda izquierda y derecha, y pecho.

Transporte	Fecha	Hora	Sujeto	Peso (kg)	Altura (m)	Edad
Tren Sarmiento	11/09/2019	18:02	Hombre	59,7	1,62	29
Subte Línea B	13/09/2019	8:21	Mujer	58,7	1,56	23
Subte Línea B	16/09/2019	8:15	Mujer	58,7	1,56	23
Subte Línea C	13/11/2019	8:30	Hombre	58,1	1,65	29
Subte Línea C	14/11/2019	8:40	Mujer	58,7	1,56	23
Subte Línea C	15/11/2019	8:42	Mujer	60,0	1,69	24

Cuadro 1: Datos de las personas que utilizaron el dispositivo para medir en los diferentes transportes públicos.

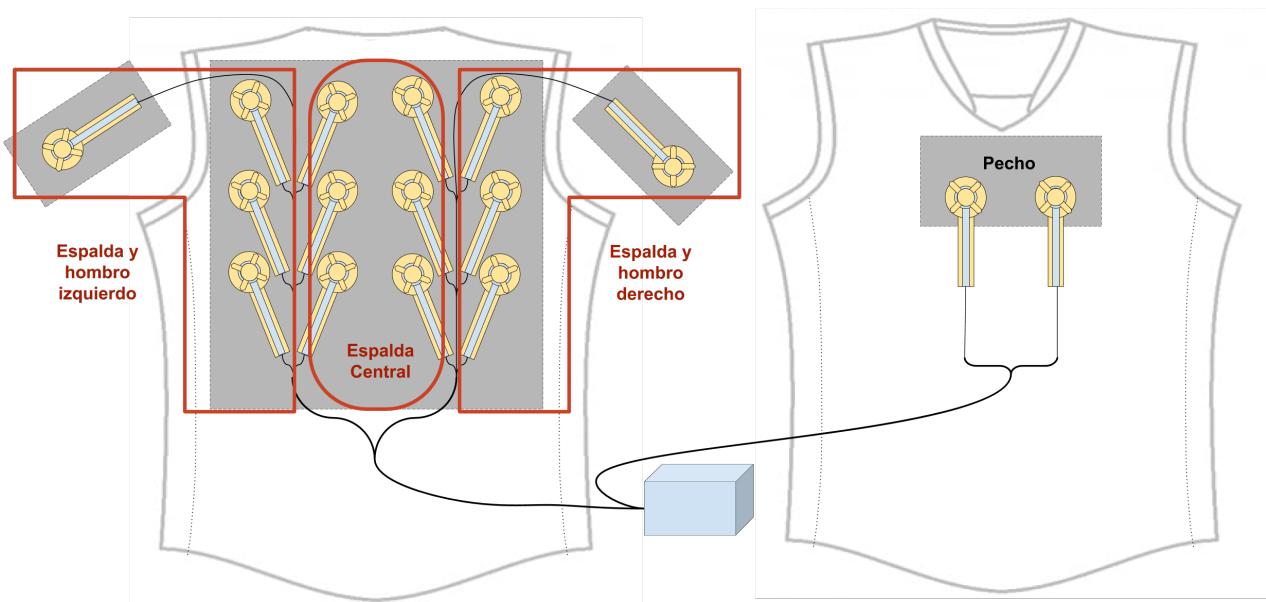


Figura 18: Disposición de los sensores sobre el dispositivo de medición.

Los medios de transporte en los que se midió fueron la línea B y C de subte a la hora pico de la mañana y el tren Sarmiento por la tarde. En la figura 19 se muestra mediante una fotografía tomada en uno de los días de medición, la gran cantidad de personas que viajaban en el subte. En la figura 20 se muestra una de las mediciones en el subte B donde se detalla la fuerza aplicada sobre cada sensor en función del tiempo. Si bien esta medición fue más larga, se tuvo que recortar el tiempo para un análisis más representativo de lo que se quiere estudiar. Es por esto que en general se tomarán los intervalos temporales en los que el medio de transporte utilizado tenga una densidad considerablemente alta de personas y no se estudiarán los casos en los que la misma sea baja.

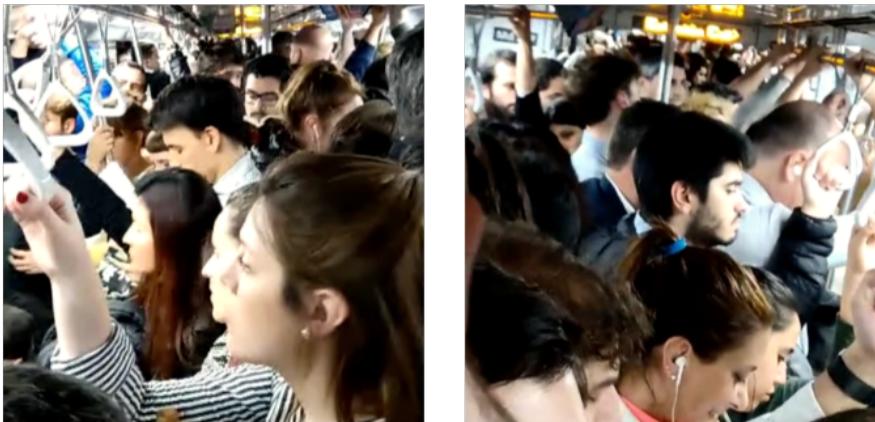


Figura 19: Fotografías tomadas en un viaje en el subte a la hora pico de la tarde.

1

Por otro lado, se realizó un promedio por ventanas de menos de 2 segundos a todas las mediciones para tener una mejor visualización de los datos. En la figura 34 se puede observar que si bien las fuerzas pierden magnitud, se puede distinguir claramente que diferentes sensores sienten fuerzas cualitativamente distintas. En general, esta respuesta frente a qué sensores son los que median más, menos o incluso no median nada apreciable, se repitió a lo largo de todas las mediciones (ver Apéndice). En la figura 22 se pueden ver las series temporales de cada sensores según la zona del cuerpo en la que estaban ubicadas.

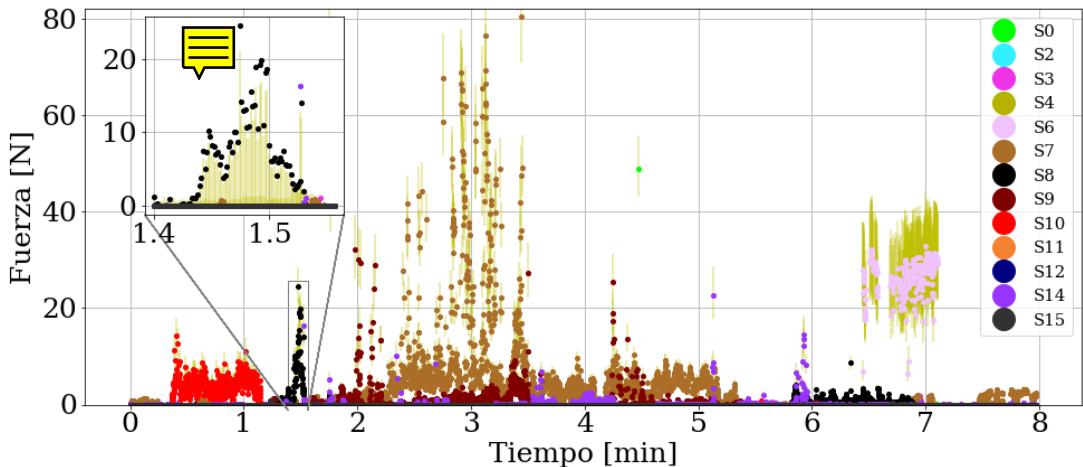


Figura 20: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo de todos los sensores para todos los sensores para un viaje en el subte B a la hora pico en la mañana del día 13/9.

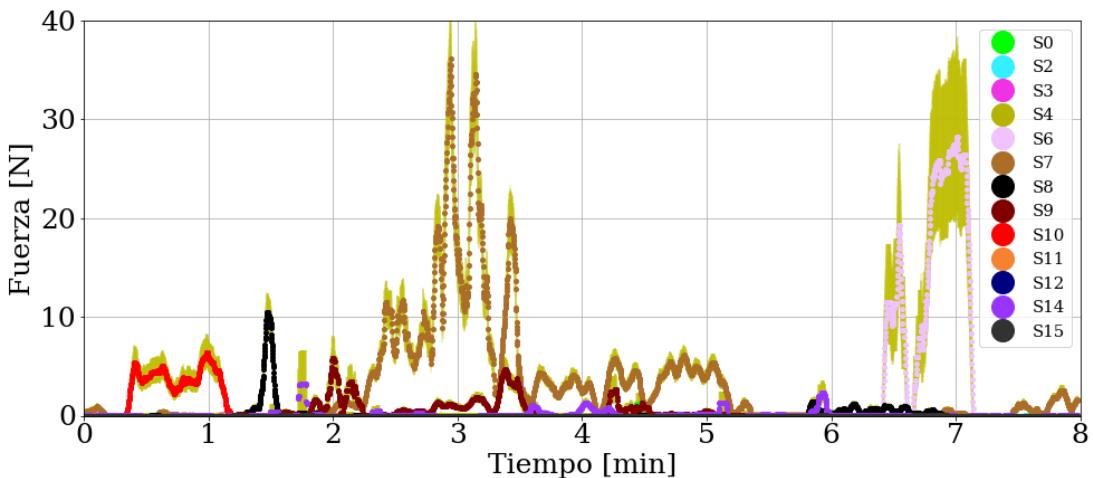


Figura 21: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo de todos los sensores con un promedio móvil con una ventana menor a dos segundos, para la primera medición en el subte B.

Según la bitácora de la persona que medía en este viaje, se pudo identificar que el viaje no sólo fue muy **populoso**, sino que el nivel de incomodidad era considerable. A partir de esta información se puede estimar que una fuerza promedio en el cuerpo que esté en un intervalo de entre 30N y 80N en la superficie del sensor de menos de 3cm^2 , será considerada como una de incomodidad significativa. La presión máxima equivalente a este valor sería de aproximadamente 27 Ncm^{-2} , que al compararlo con el valor de presión reportado en la bibliografía [5] de 800 gfcm^{-2} , que equivale a **aproximadamente 8 N** se tiene que estas fuerzas máximas lo superan en un orden de magnitud.



En la figura 20 se puede ver que este intervalo de valores de fuerza son alcanzados por varios sensores. En la figura 22 podemos distinguir que los sensores que registran estos niveles son los que están en la zona derecha de la espalda y el mismo hombro y a su vez también una parte de la espalda central. Por otro lado también se puede ver que no se registraron valores apreciables de fuerza para la zona del pecho y la parte izquierda de la espalda. Esto es un tanto esperable por el sólo hecho de que en general, en todas las mediciones, sólo se dispusieron de 3 sensores en el pecho, mientras que en la espalda se tuvo un máximo de 8 sensores. Es por esto que no se podría generalizar que una zona sera más propensa a ser impactada dado que no se estudiaron con los sensores dispuestos de forma simétrica.

Tomando los valores obtenidos de un promedio para cada zona que se muestran en la figura 23 se puede ver la mayor cantidad de fuerza, no sólo en cuanto a las máximas, se percibieron sobre la espalda central y derecha junto con el hombro. Si bien las fuerzas a las que se llegó fueron muy altas, el promedio para la zona de mayores fuerzas (Espalda y hombro derecho) tomó un valor de fuerza promedio de $F = (4,05 \pm 7,85) \text{ N}$ y a su vez una mediana de $F = (1,85 \pm 0,16) \text{ N}$. Por otro lado, se obtiene para la zona de la espalda central una fuerza promedio de $F = (6,16 \pm 9,46) \text{ N}$ y una mediana de $F = (1,83 \pm 0,29) \text{ N}$.

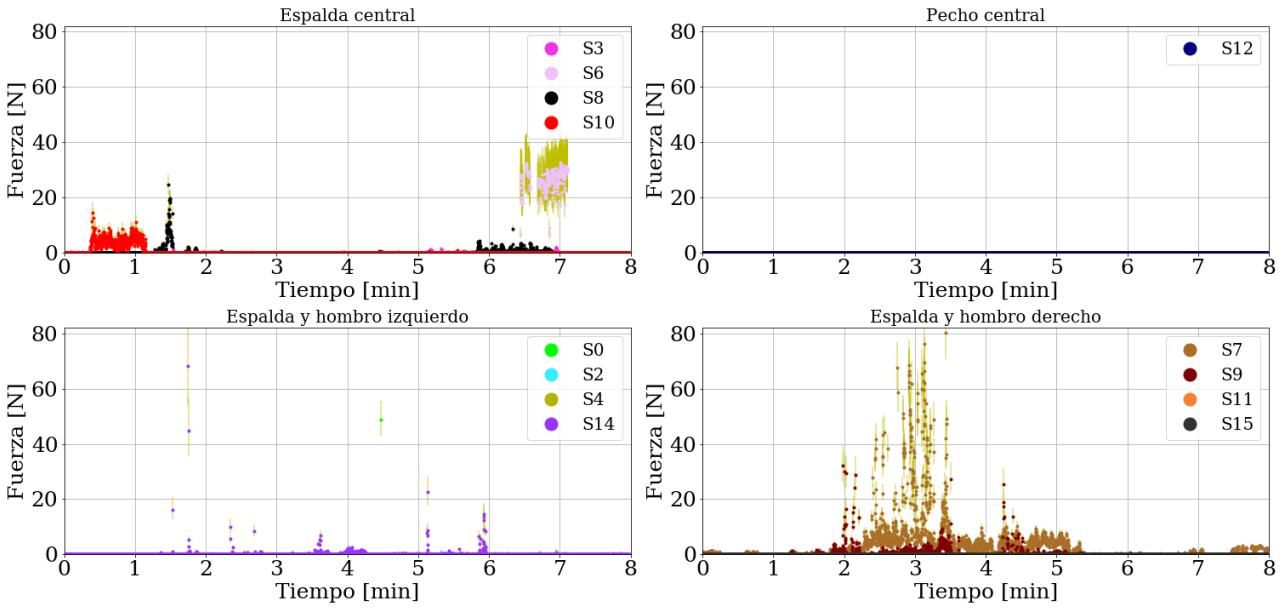


Figura 22: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la primer medición en el subte B.

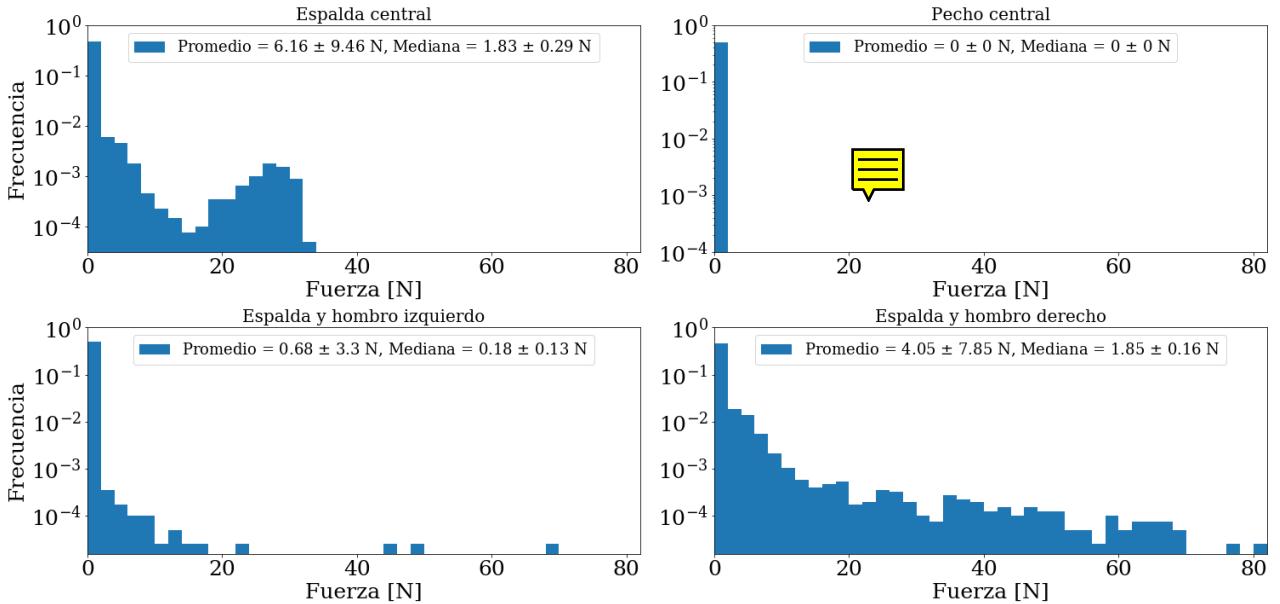


Figura 23: Histogramas para las fuerzas en función de la zona en la que se encontraban para la primer medición en el subte B.

A modo de comparación entre las distintas mediciones exitosas que se obtuvieron, se puede ver en las figuras 24 y 25 los histogramas que representan la distribución de fuerzas obtenidas en cada medición, teniendo en cuenta todos los sensores involucrados en cada una. Se puede ver que hay diferencias apreciables entre qué fuerzas máximas se obtienen según el medio de transporte, y consecuentemente afectará al valor de fuerzas promedio o la mediana. En la figura 25 se puede incluso comparar el comportamiento para una misma línea de transporte durante tres días consecutivos. Se puede observar que hay una gran variabilidad entre días y eso también genera distintas fuerzas promedio para cada medición.

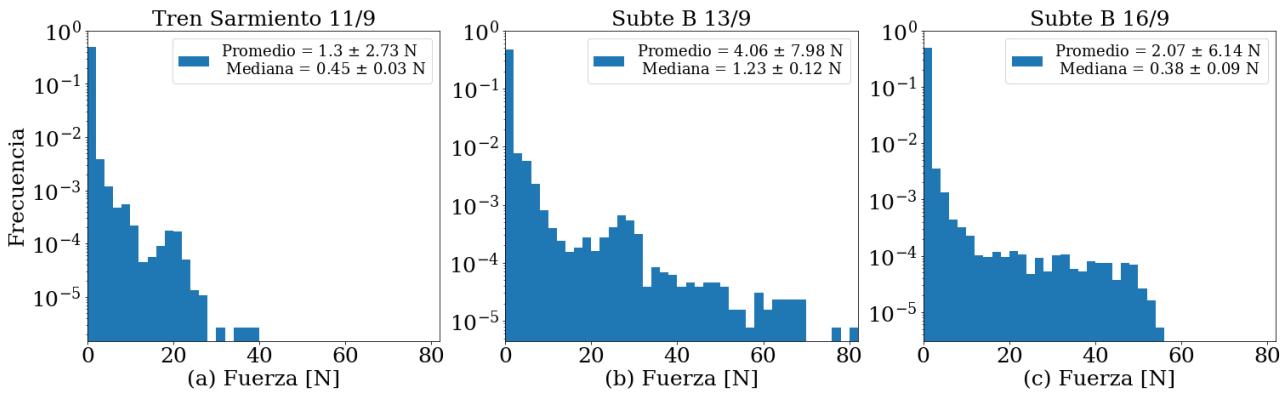


Figura 24: Histogramas para las fuerzas obtenidas para cada medición, sumando la lectura de cada sensor para los dos viajes en la línea B y en el tren Sarmiento. Se optó por graficar en una escala logarítmica para poder visualizar mejor la frecuencia de cada fuerza.

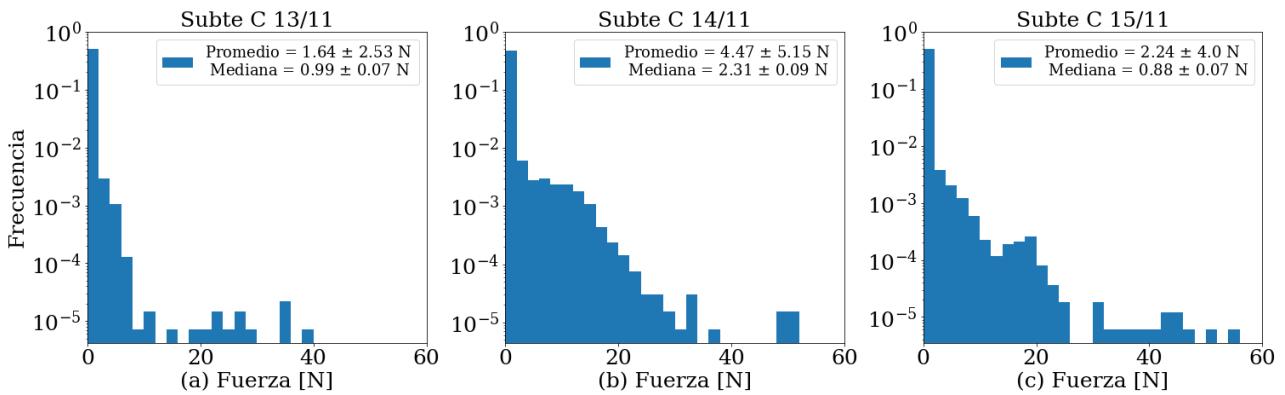


Figura 25: Histogramas para las fuerzas obtenidas para cada medición, sumando la lectura de cada sensor para los tres viajes en la línea C.

Podemos ver también que la medición del 13/9 en la línea B del subte es la que mayores fuerzas registra, es por esto que se decidió mostrar en detalle esta medición, dejando en el Apéndice las series temporales para cada una de las otras mediciones, junto con su promedio por ventanas, separación entre las zonas del cuerpo y su respectivo histograma.

Con respecto a conocer en qué rangos de fuerzas las personas manifestaron incomodidad severa en todas las mediciones obtuvimos discrepancias en estos valores para cada persona pudiendo ser la causa la zona del cuerpo en la que se sentían las mismas. En la medición que corresponde al histograma (b) de la figura 25, se obtuvieron fuerzas apreciables durante poco menos de 4 minutos de entre 10 a 30 N y luego eventualmente se reiteraron pero de menor duración para uno de los sensores ubicados en la sección derecha del pecho. En este caso, la persona que midió era una mujer de 23 años de edad que manifestó en su bitácora que durante esos lapsos se superó lo que ella consideraba estar incómoda para sentir dolor. Las series temporales y sus correspondientes histogramas se encuentran en el Apéndice. En la medición posterior correspondiente a la del histograma (c) de la figura 25, la persona que medía era otra mujer de 24 años de edad que manifestó en su bitácora una sensación también incluso dolorosa sobre su hombro. Esta zona se corresponde según nuestras mediciones a una fuerza de entre 5 a 20 N (ver Apéndice).



6. Experimento controlado en el laboratorio

Finalmente, se hizo una experiencia con el objetivo de determinar una relación entre la fuerza que se siente en función de la densidad de personas que rodee al sujeto. Para esto, se realizaron mediciones con el chaleco bajo situaciones controladas en laboratorio con un total de 22 personas que voluntariamente accedieron a participar. Se tomaron los datos de las personas incluyendo su peso y medidas para poder hacer a posterior un análisis computacional con simulaciones teniendo en cuenta el volumen de las personas. En el Apéndice se encuentra la tabla con las características que se relevaron. El rango etario de los participantes se encuentra entre los 21 y 47 años. Un estudio del año 2017 [12] estima que el 41,5 % de la población argentina tiene entre 20 y 49 años de edad, tomando como base de datos la Encuesta Permanente de Hogares del INDEC. Por otro lado, se encontró que el índice de masa corporal (IMC) promedio de la Argentina es de $26,44 \text{ kg}/\text{m}^2$. Este valor se calcula como la relación $\frac{\text{peso}}{\text{altura}^2}$ y en el caso de la muestra que se tuvo en este experimento, el IMC promedio fue de $22.8 \pm 1.7 \text{ kg}/\text{m}^2$. Según estos índices no se puede afirmar que la muestra es representativa de la población argentina, pero será valiosa de todas formas.

La experiencia consistió, en todos los casos, en un espacio de volumen acotado, en donde entraron los voluntarios. Una de ellos, llevó puesto el dispositivo, y se les dio instrucciones distintas para cada repetición del experimento. El procedimiento fue medir la fuerza durante un intervalo de tiempo a densidad fija, y luego aumentar la densidad disminuyendo el volumen, para así volver a medir. En la figura 26 se muestra una fotografía capturada durante la experiencia.



Figura 26: Medición realizada en el laboratorio para determinar fuerza como función de la densidad. Se marca a la persona que llevaba puesto el dispositivo de medición.

La primera medición denominada ‘configuración dinámica’, fue pidiéndole a la persona que tenía el dispositivo, que caminara en la medida de lo posible de un extremo al otro del recinto ida y vuelta. En la segunda (‘configuración estática’), todos los voluntarios se orientaron hacia

la misma dirección y quedaron quietos mientras se variara la densidad.



En la figura 27 se grafica la fuerza en función del tiempo seccionado según el volumen correspondiente para la configuración estática. En esta medición se logró obtener cinco densidades diferentes manteniendo un total de 15 personas dentro del recinto. Dadas las proporciones que tenían las personas involucradas, estas densidades fueron de aproximadamente 9.3, 10.0, 10.8, 11.5 y 11.8 personas por m^2 respectivamente con un error menor al 2% para cada una.

En la figura 28 se grafica la fuerza en función del tiempo seccionado según el volumen correspondiente para la configuración dinámica. Esta medición consistía en que la persona que mide se mueva de un extremo al otro del recinto para diferentes densidades. En este caso, se logró obtener sólo tres densidades diferentes ya que para densidades mayores el movimiento necesario no era fácilmente alcanzado. Se tuvieron un total de 14 personas dentro del recinto logrando que las densidades fueran de aproximadamente 9.0, 9.6 y 10.1 personas por m^2 respectivamente con un error menor al 2% para cada una.

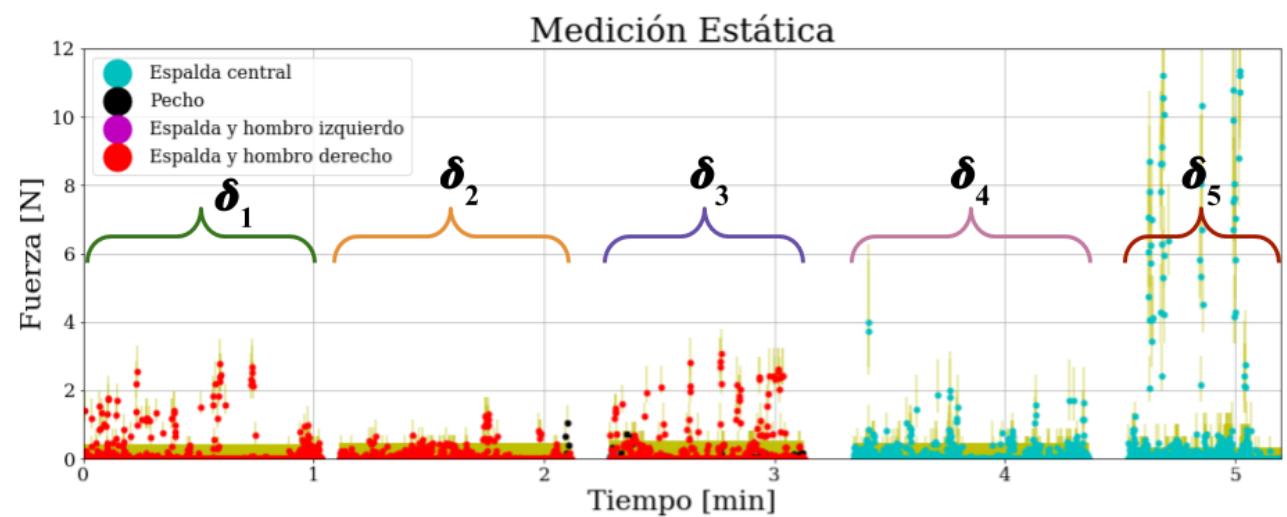


Figura 27: Gráfico de fuerza en función del tiempo para diferentes volúmenes, en la configuración estática.



Durante las mediciones siguientes se tuvo el inconveniente de que algunos sensores sufrieron daños o se descolocaron de su posición. Dado que no se pudo identificar el momento exacto en el que esto sucedió, se decidió omitir la señal de esos sensores para no proveer resultados que no representen lo que se está sintiendo en la realidad. Por este motivo, el experimento a continuación contó con 12 sensores en total, y sólo se mostrarán las señales de éstos.

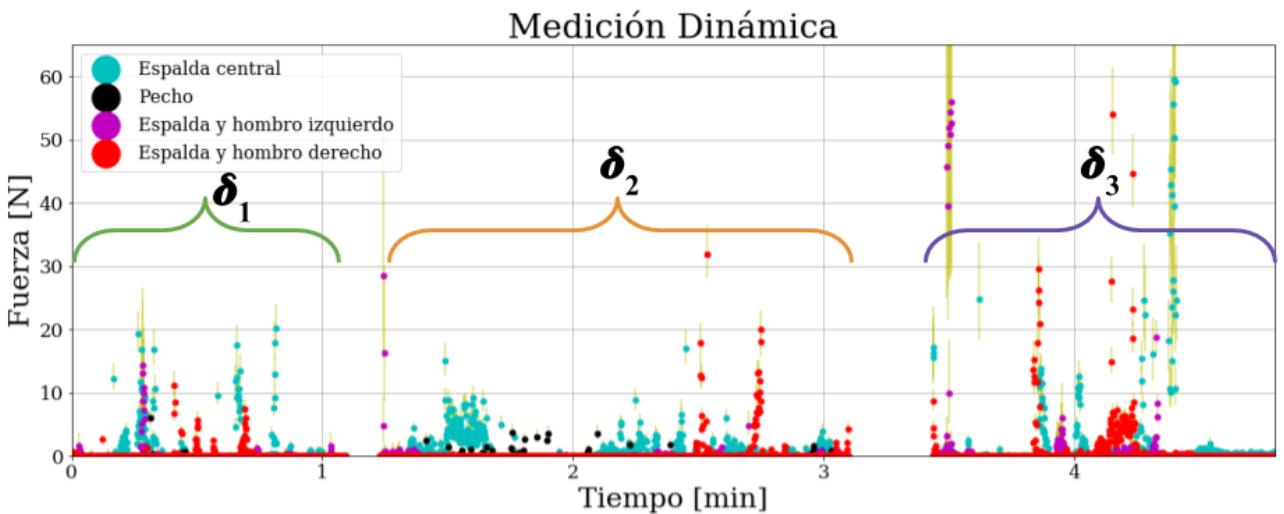


Figura 28: Gráfico de fuerza en función del tiempo para diferentes volúmenes, para la configuración dinámica.

A continuación, se propuso agrupar las fuerzas para una misma densidad, para cada medición, y así ver cuál es la distribución de fuerzas que se tiene según el volumen. En las figuras 29 y 30 se puede ver que a medida de que la densidad aumenta, la fuerza que se registra toma valores mayores. Si bien no necesariamente lo hace en sus frecuencias propias, aparecen fuerzas máximas significativamente diferentes. Sobre cada histograma se observan los valores promedios de fuerza con su incertezza y también la mediana. Se puede inferir un comportamiento creciente del promedio de la fuerza a medida que aumenta la densidad.

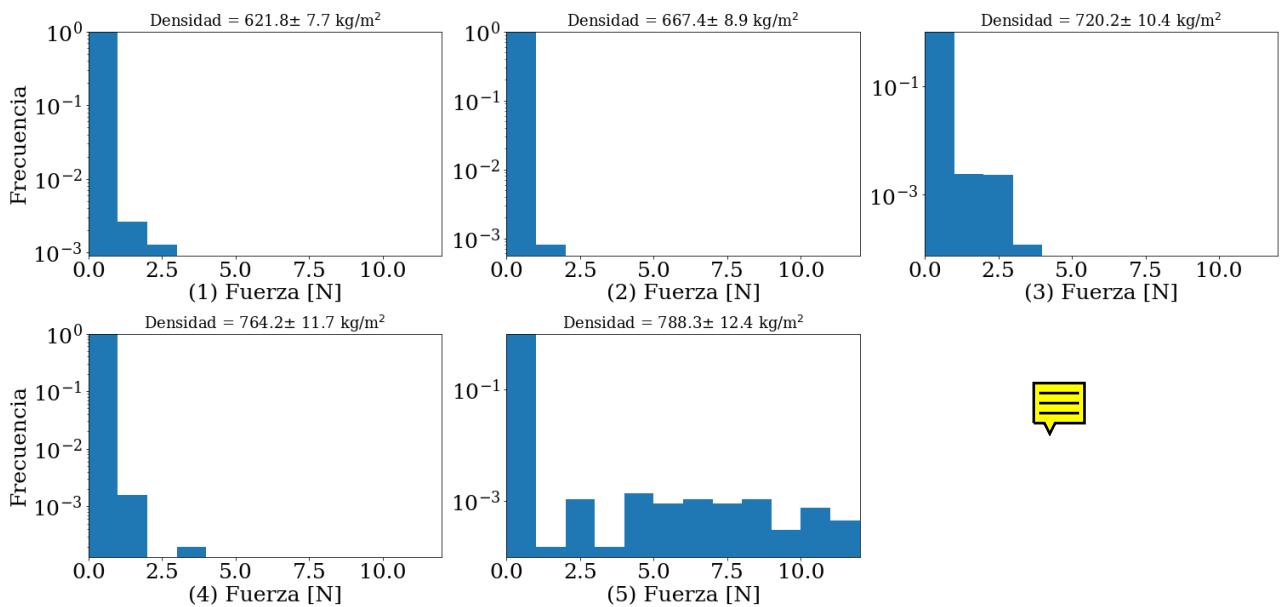


Figura 29: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

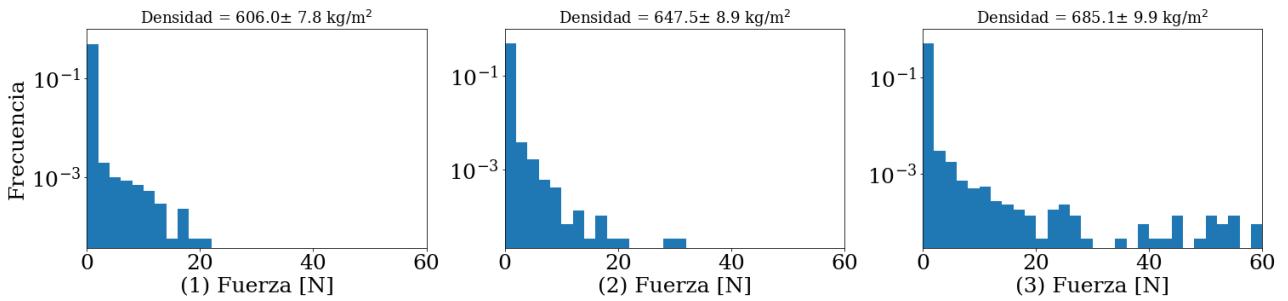


Figura 30: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, para la configuración dinámica.

Dado que una densidad en unidades de personas por m^2 no es representativo de una muestra generalizable, se optó por encontrar el equivalente a esta densidad pero en una unidad de peso por m^2 . Una aclaración no menor al momento de la experiencia, es que el volumen fue fijado con un pistón de posición regulable, que era sostenido por otros voluntarios. Este método nos limita a la hora de poder establecer múltiples volúmenes dadas las limitaciones en la fuerza que soporten esas personas y también nos proporciona una incertidumbre considerable en la posición ya que se notó que en la mayoría de las mediciones el pistón no se mantuvo fijo.

En principio se nota una diferencia significativa entre las configuraciones dinámica y estática, llegando en algunos casos a valores de hasta un 300 % más en la primera que en la segunda. Incluso, es destacable que la mayoría del tiempo, casi todos los sensores registraron fuerzas nulas o muy bajas. En todos los casos, estos valores nulos superaron el 90 % del total de los datos. Sin embargo, la variable que interesa a la hora de estudiar situaciones reales, son los máximos de fuerza alcanzados y su intervalo de tiempo; ya que son estos los valores relevantes para estimar posibles lesiones o asfixia en las personas. Se encontraron resultados similares en otros trabajos. [13]

A su vez, se puede ver que las fuerzas máximas en los transportes públicos son del orden de las que se sintieron en la medición dinámica. Esto puede deberse a que el tipo de comportamiento que se tiene dentro de un medio de transporte no se puede considerar estático, ya que el movimiento propio característico que tienen los de Buenos Aires proporciona cierto dinamismo apreciable. Incluso el traslado de gente al querer entrar o salir del transporte puede estar generando movimientos que contribuirán a la variación de las fuerzas en un tiempo considerable y también como eventuales “golpes”. Todo esto puede influir al momento de estudiar las fuerzas que se ejercen internamente dentro del medio de transporte y es por esto que si se quisiera repetir el experimento controlado, se debería hacer más énfasis en estudiar configuraciones dinámicas.

Si bien el objetivo de este experimento se propone estudiar la relación que hay entre la densidad de personas y la fuerza sobre las mismas, se decidió que el tipo de datos que se maneja no provee de la suficiente información como para determinar confiablemente esta relación. A pesar de esto, se considera una experiencia prometedora que puede dar información relevante si se tomaran en cuenta los siguientes recaudos:

- Disponer de más sensores para cubrir mayor superficie en el cuerpo.
- Diseñar un recinto más eficiente: que se pueda controlar mejor el volumen del mismo.

- Colocar cámaras en una posición fija eficientemente elegida para poder observar lo que sucede en el recinto e indicar lo que sea necesario para que se corrija cualquier posible hecho no deseado por los participantes.
- Proteger cuidadosamente todo el dispositivo.

7. Conclusiones

Se pudo realizar un estudio abarcativo de los sensores *Tactilus Free Form (Square Round) Sensor* que determinó aceptablemente su comportamiento a la hora de la calibración. Se encontró que los sensores redondos superan ampliamente a los cuadrados en cuanto a la respuesta dada para una determinada fuerza. Por este motivo, se utilizaron 16 sensores redondos en la mayoría de las mediciones, a excepción de las últimas ya que algunos sufrieron un desgaste acelerado. Se decidió reemplazar los faltantes por los cuadrados para no perder áreas del cuerpo relevantes para las mediciones.

Una vez que se tuvieron todos los sensores calibrados se pudo disponer del dispositivo para las diferentes mediciones. Se logró medir exitosamente en 6 viajes en el subte B y C, y en el tren Sarmiento con diferentes personas usando el dispositivo. Se encontraron diferentes rangos de fuerzas según la incomodidad de las personas y fuerzas máximas de más de 27 Ncm^{-2} . Los valores encontrados superan en un orden de magnitud al valor de referencia para incomodidad que se detalla en la bibliografía de $800 \text{ g}\vec{f}\text{cm}^{-2}$, que equivaldría a una fuerza de aproximadamente 8 Ncm^{-2} .

Se registró a su vez una mayor aparición de fuerzas sobre el centro de la espalda y los hombros en la mayoría de las mediciones, pero no se realizaron las suficientes como para poder determinar que la frecuencia sobre estas zonas será mayor que en las demás. Se debe remarcar que esto también es esperable, ya que se dispuso de una cantidad mayor de sensores en la espalda y en los hombros que en el pecho, y por esto se adquirió una cantidad de datos mayor.

Se remarcó la aleatoriedad de las fuerzas que se obtienen en los diferentes transportes, ya sea en cuanto a la máxima como en cuanto a la cantidad de fuerzas no nulas. Además también se comparó entre una misma línea de subte (Línea C) y se pudo observar que estas diferencias también aparecen notoriamente variando entre fuerzas máximas de entre 40 N hasta 60 N.

Se encontró comparando con la bitácora de cada sujeto que el intervalo de fuerzas de incomodidad es diferente, por lo que podemos decir que estos parámetros son subjetivos. Cada persona manifestó sensaciones de incomodidad que se correspondieron con valores de fuerza de entre 10 a 30 N durante poco menos de 4 minutos para un caso, y de 5 a 20 N durante menos de 10 minutos. Con estos resultados se espera proveer para diferentes análisis, ya sean computacionales como sociales, los distintos valores de fuerza que se encuentran.

En cuanto a los resultados obtenidos en el experimento controlado se encontró que dadas dos configuraciones diferentes (la dinámica y la estática) en cuanto a lo que suceda dentro de un recinto, la magnitud de las fuerzas que aparecen difieren en hasta un 300 %, siendo mayores las de la primera. De hecho, las fuerzas máximas que se registran en las mediciones de la configuración dinámica son del orden de las que aparecen como máximas en los transportes públicos. Se encuentra esto satisfactorio ya que dado que se considera al interior de un subte o tren como

un recinto que también sufre variaciones a lo largo del tiempo por el propio movimiento del mismo, este escenario se puede modelar con lo que se denominó una configuración dinámica y así poder reproducir este tipo de eventos en una situación controlada para un estudio más definido. Se pudo analizar cualitativamente que a medida que la densidad aumenta, la fuerza también lo hace ya sea en cuanto a los máximos como en la frecuencia de aparición de valores no nulos.



Si bien estos resultados resultaron muy gratificantes, debido a varias dificultades o inconvenientes y el tipo de señales que se tienen, se concluyó que no se puede determinar una relación confiable entre las fuerzas ejercidas sobre una persona y la densidad de gente presente. Es por esto que este tipo de experiencia es prometedora para lograr encontrar esta relación, y se recomienda que a futuro se rehaga con ciertas modificaciones técnicas, y de ser posible con más sensores.

8. Reconocimientos



Se agradece la gran ayuda y participación de Ignacio, Fernando y todos los demás becarios del grupo; y especialmente a nuestros directores Guillermo y Claudio por la disposición que tuvieron siempre para con nosotras.

También se agradece a todas las personas que se ofrecieron voluntariamente a participar del experimento controlado con todo lo que eso conllevó y la paciencia que tuvieron al momento del mismo.

Se publicó un póster de este trabajo y se expuso una charla en el congreso de la AFA. Se agradece a todo el equipo de organizadores por la oportunidad de exponer entre ambas la charla.

Referencias

- [1] Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487.
- [2] Cornes, F.E., Frank, G.A., Dorso, C.O. (2018). Panic contagion and the evacuation dynamics. *PhysicaA*.
- [3] Sticco, I.M., Frank, G.A., Cerrotta, S., Dorso, C.O. (2017). Room evacuation through two contiguous exits. *PhysicaA* 474, 172-185.
- [4] Sticco, I.M., Cornes, F.E., Frank, G.A., Dorso, C.O. (2017). Beyond the faster-is-slower effect. *PHYSICAL REVIEW E* 96, 052303-1 - 052303-9.
- [5] Cornes, F.E., Frank, G.A., Dorso, C.O. (2017). High pressures in room evacuation processes and a first approach to the dynamics around unconscious pedestrians. *PhysicaA* 484, 282-298.
- [6] Frank, G.A., Dorso, C.O. (2015) Panic evacuation of single pedestrians and couples. *WSPC/INSTRUCTIONFILE*.

- 
- [7] Zhu, Y., Chen, F., Wang, Z (2016). Research on Physical Force of High Density Crowd. *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics* 2016, 480-484
 - [8] FSR® Integration Guide Evaluation Parts Catalog
 - [9] Tactilus Free Form Full Product Line Illustrations
 - [10] Dual-Range Force Sensor DataSheet
 - [11] Parmar, S., Khodasevych, I., Troynikov, O. (2017). Evaluation of flexible force sensors for pressure monitoring in treatment of chronic. *Sensors*.
 - [12] Instituto de Estudios Laborales y Sociales - Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, Informe N°9 (2017)
 - [13] Zuriguel, I.; Echeverría, I.; Maza, D.; Hidalgo, R.C.; Martín-Gómez, C.; Garcimartín, A. (2020). Contact forces and dynamics of pedestrians evacuating a room: The column effect

9. Apéndice

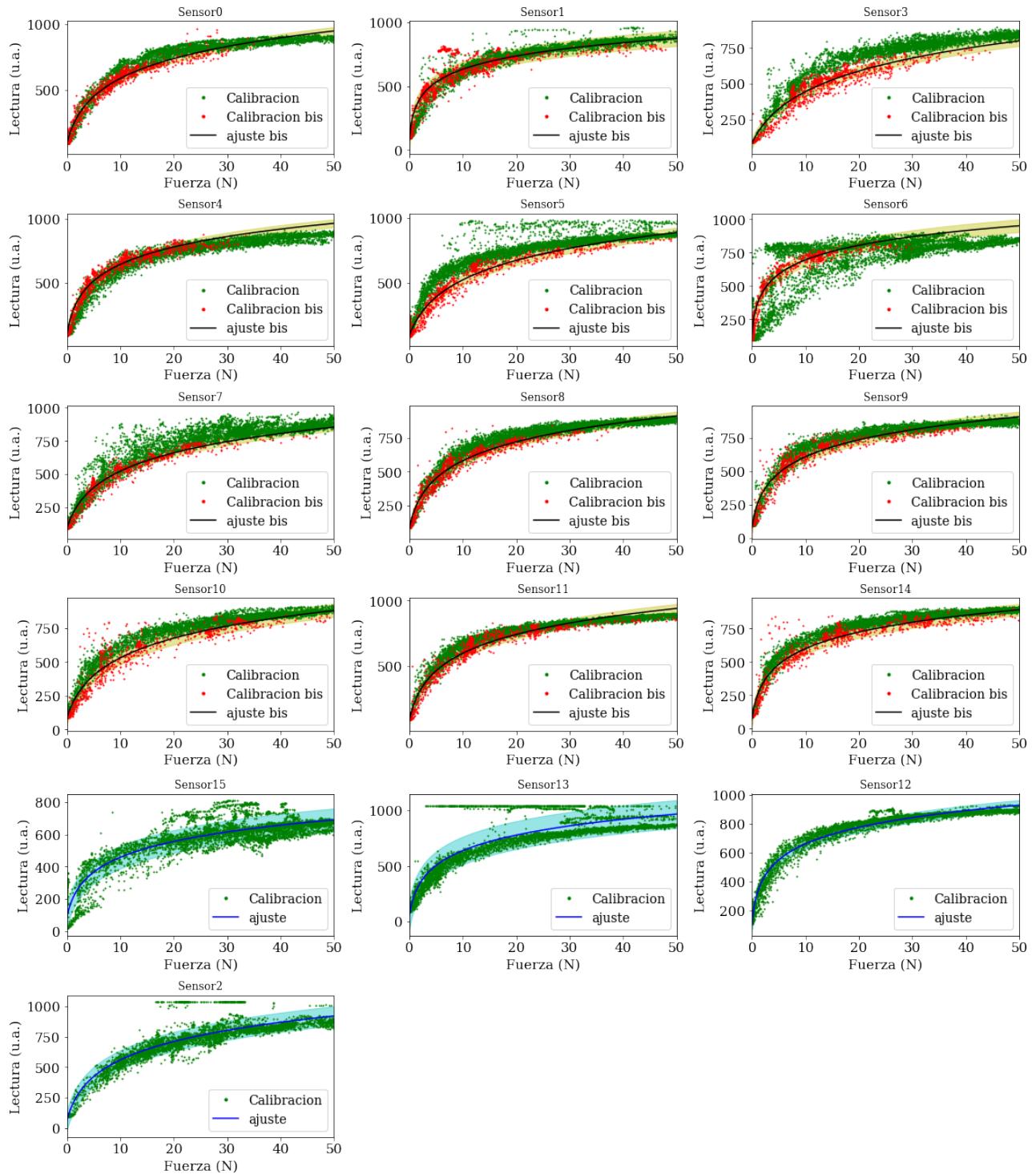


Figura 31: Gráfico correspondiente a los ajustes de calibración de todos los sensores circulares junto con su cinturón de confianza. Se apreciaron diferencias en los parámetros del ajuste para cada sensor.

Sensor	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	σ lectura
Circular				
0	2.47	239.78	-1.44	29.54
1	278.56	152.44	-0.26	60.50
3	-211.66	254.38	-3.24	35.68
4	152.45	206.64	-0.71	30.99
5	-105.36	251.04	-2.23	37.65
6	318.65	161.60	-0.33	48.19
7	-21.42	221.80	-1.65	27.35
8	60.60	216.00	-1.11	31.61
9	151.10	193.12	-0.68	38.63
10	-53.78	236.96	-1.79	48.22
11	52.29	225.45	-1.14	34.42
14	159.25	186.37	-0.63	43.19
2	-26.01	240.57	-1.41	79.73
12	263.07	170.30	-0.39	35.46
13	138.74	211.16	-0.68	125.95
15	96.18	151.44	-0.91	70.70
Cuadrado				
2	-496.21	296.04	-7.94	36.02
13	-1276.24	440.95	-19.64	28.45
15	-3361.14	863.58	-51.28	23.30

Cuadro 2: Valores obtenidos para los parámetros del ajuste logarítmico y para la dispersión de los datos respecto al ajuste, para todos los sensores. Se utilizó esta dispersión para calcular la incertezza en la predicción de fuerzas, en lugar de la matriz de covarianza de los parámetros, ya que ésta tomaba valores muy pequeños en comparación.

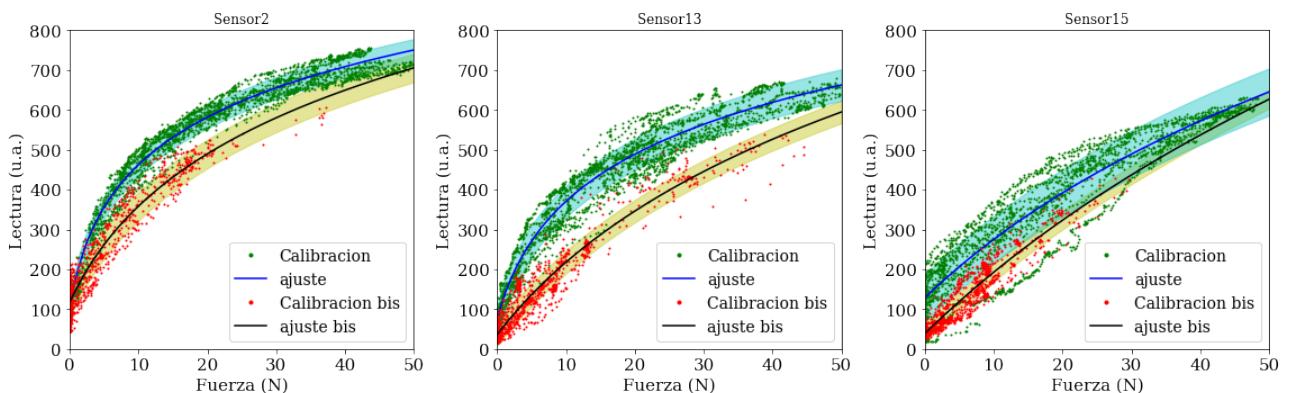


Figura 32: Gráfico correspondiente a los ajustes de calibración de los sensores cuadrados junto con su cinturón de confianza. Se apreciaron diferencias en los parámetros del ajuste para cada sensor.

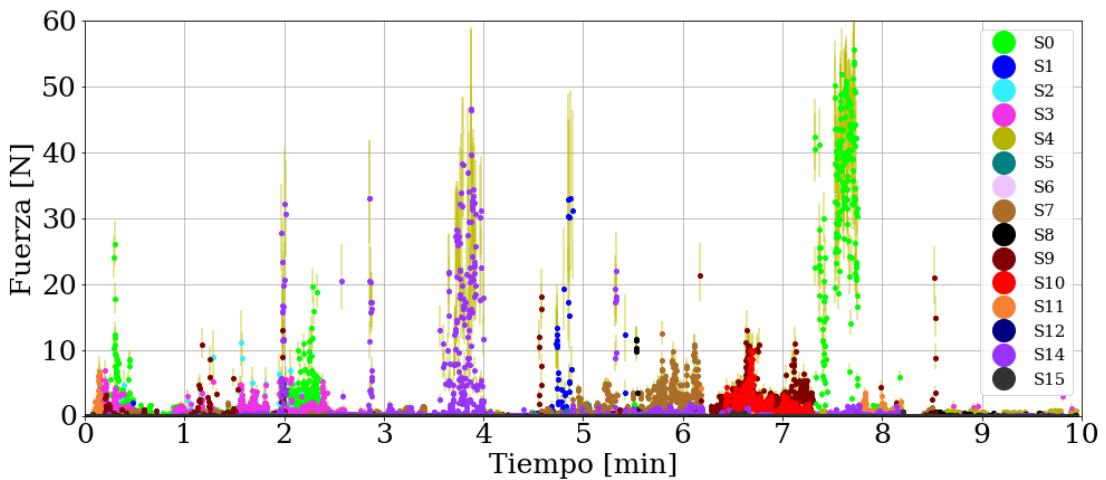


Figura 33: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo para todos los sensores para un viaje en el subte B a la hora pico en la mañana otro día.

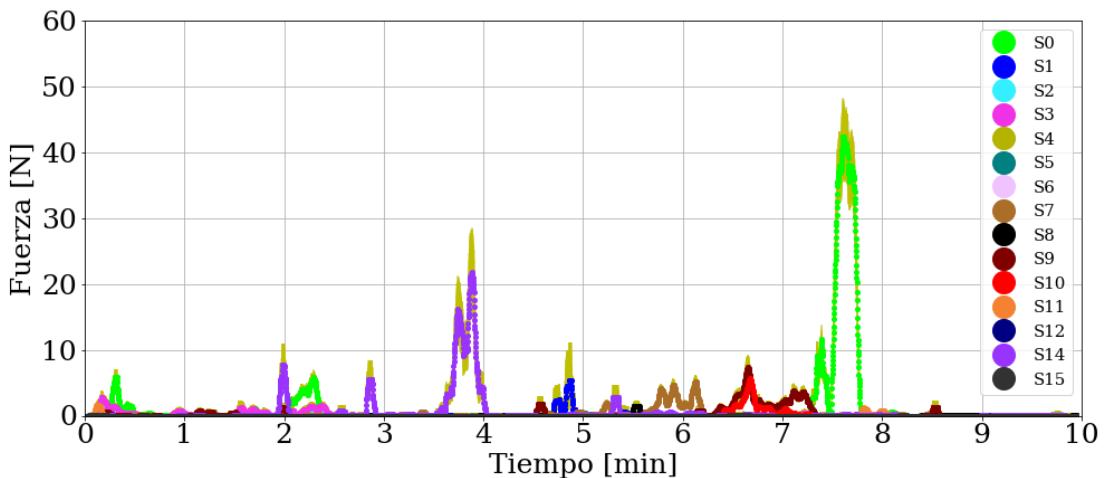


Figura 34: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo con un medias móviles con una ventana menor a dos segundos, para la segunda medición en el subte B. Se muestran todos los sensores.

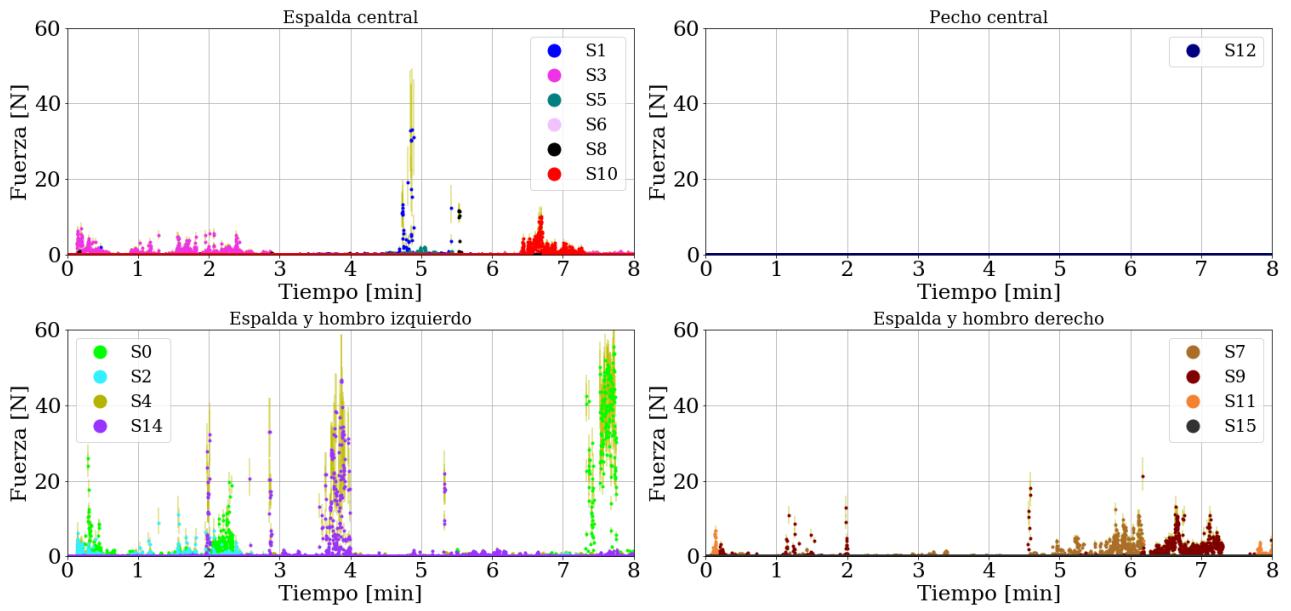


Figura 35: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la segunda medición en el subte B.

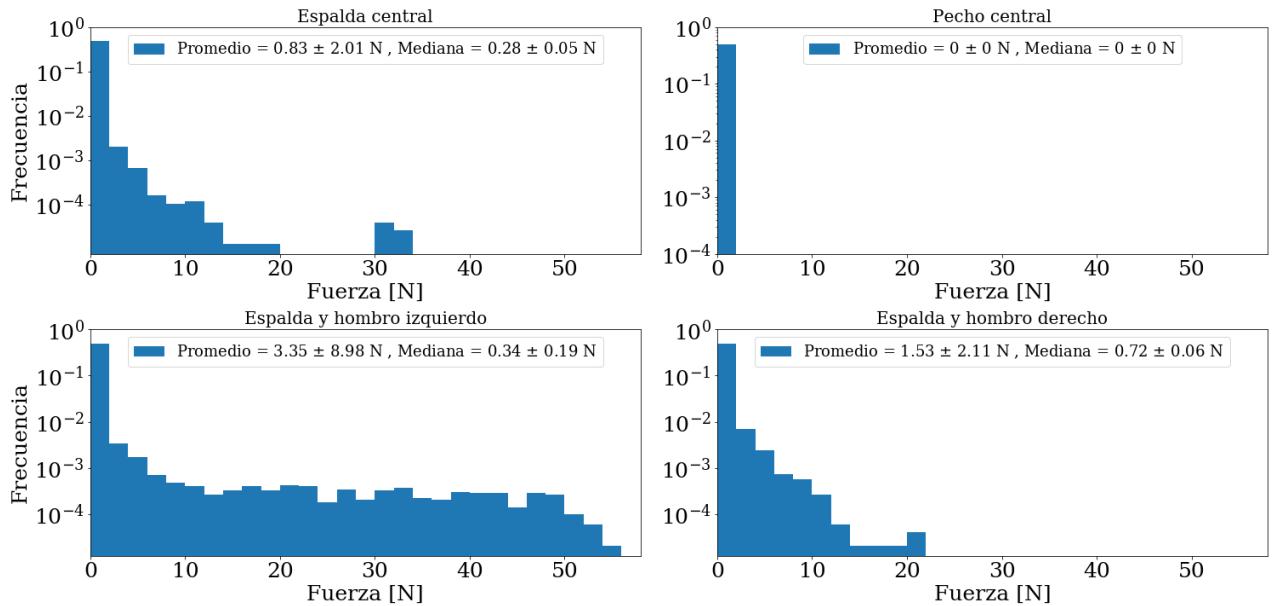


Figura 36: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

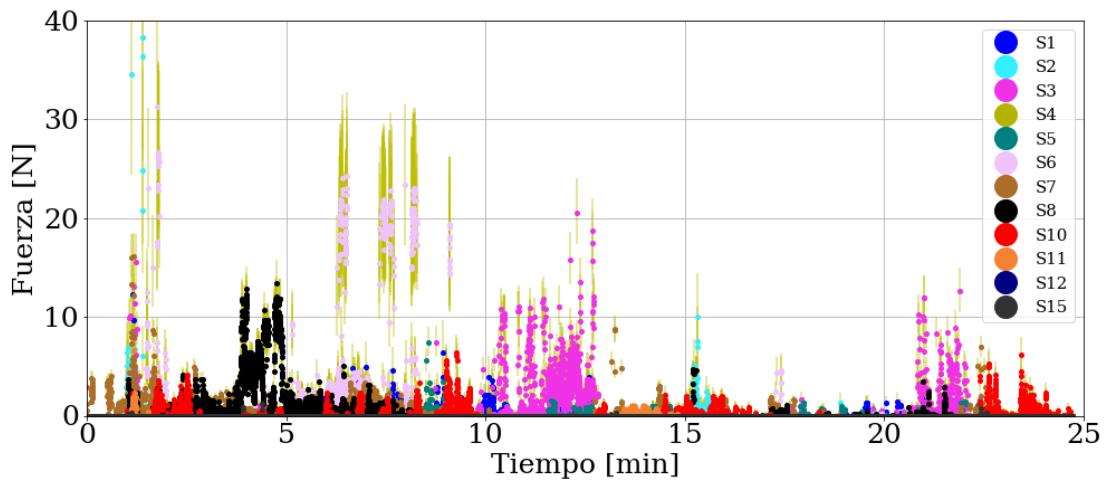


Figura 37: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo para todos los sensores para un viaje en el tren Sarmiento a la hora pico en la mañana.

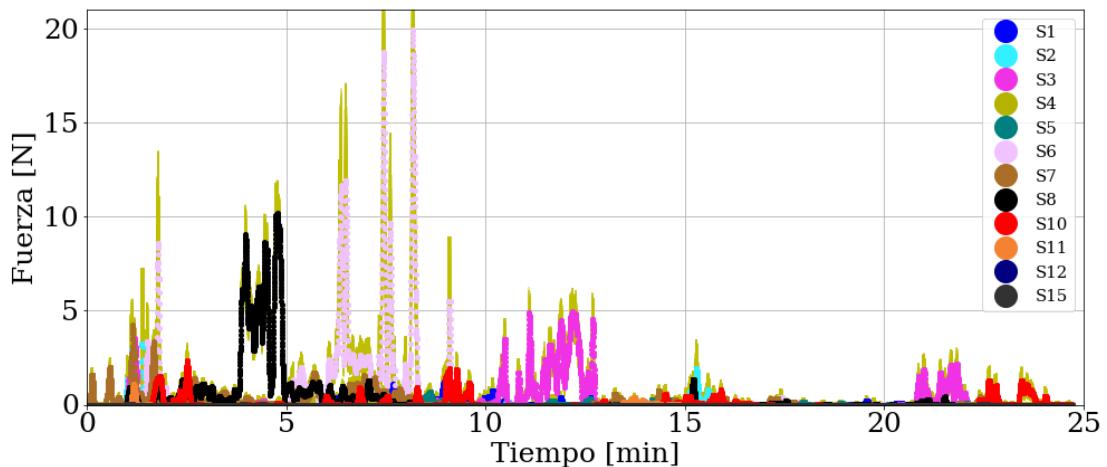


Figura 38: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo con un medias móviles con una ventana menor a dos segundos, para la primer medición en el tren Sarmiento . Se muestran todos los sensores.

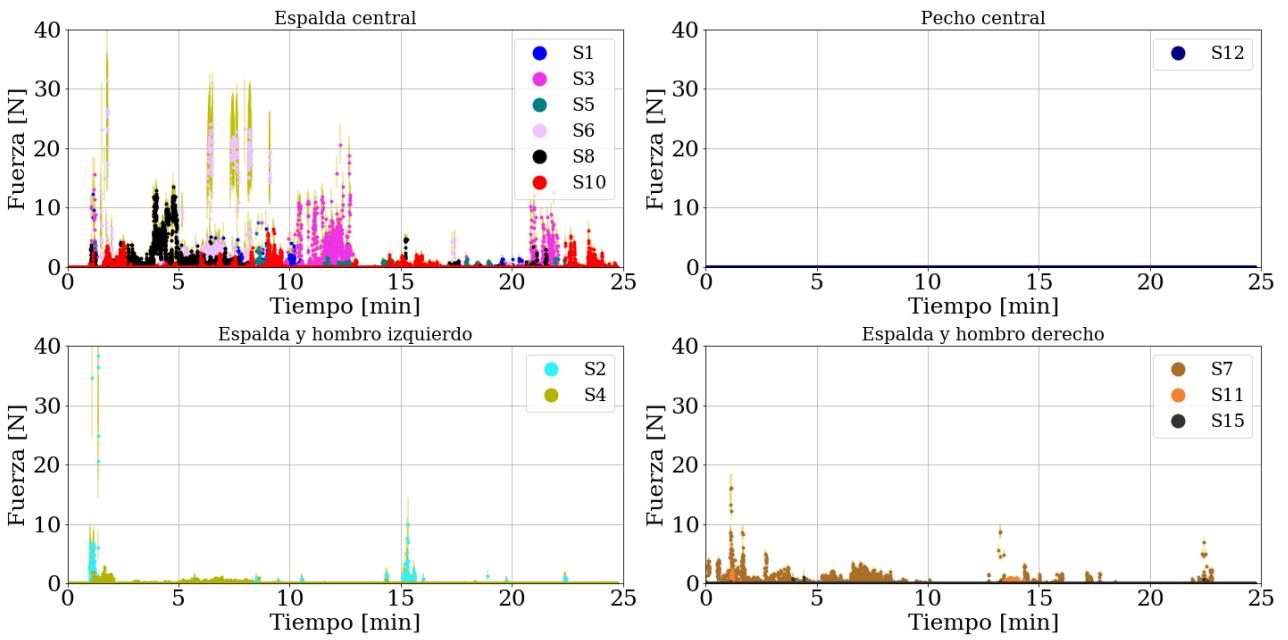


Figura 39: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la primer medición en el tren Sarmiento.

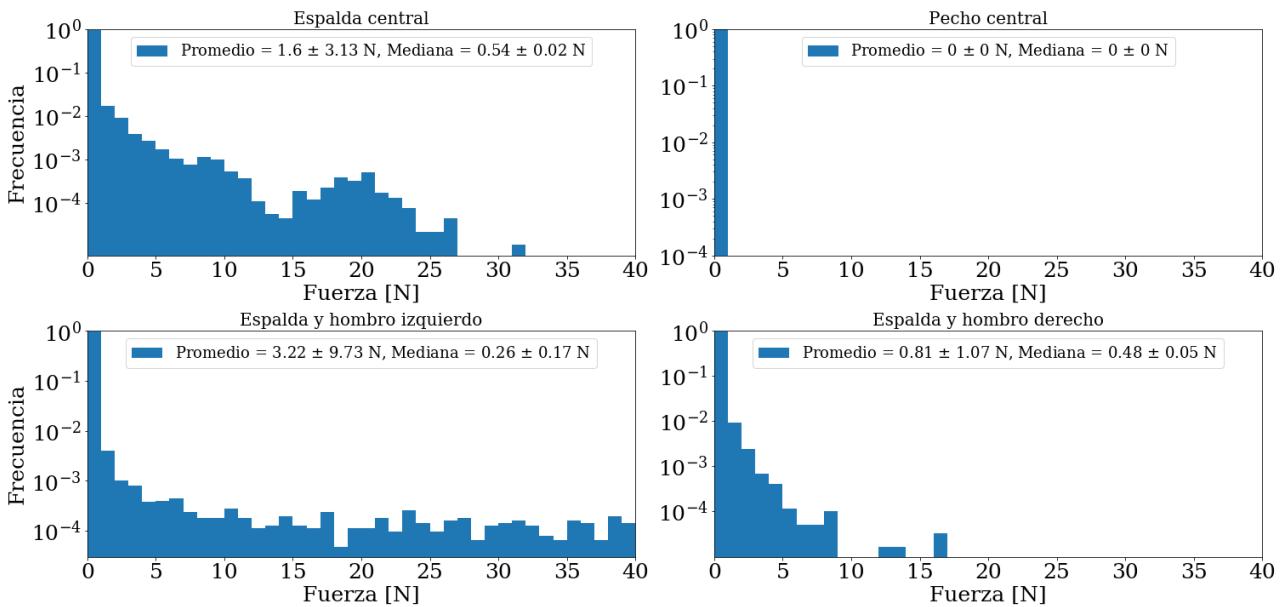


Figura 40: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

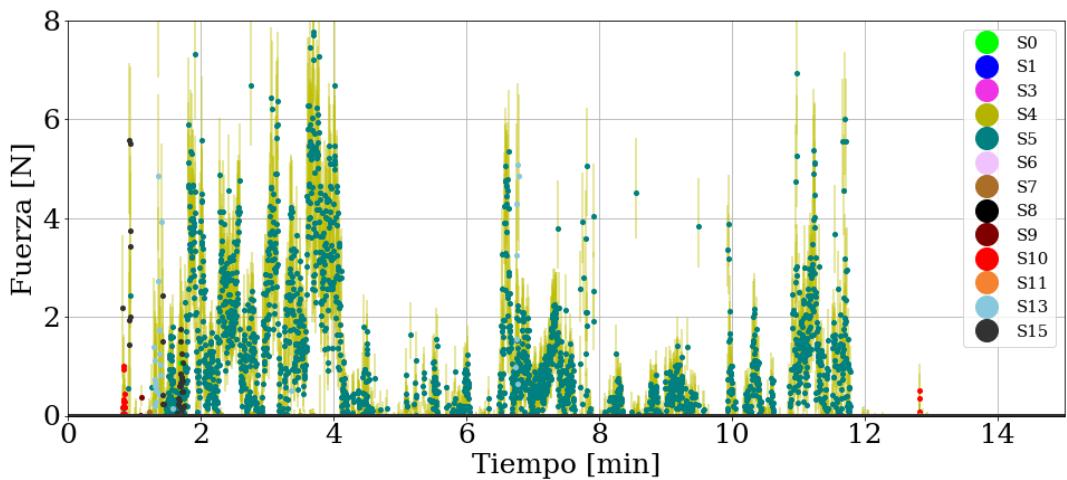


Figura 41: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo para todos los sensores para un viaje en el subte C a la hora pico en la mañana.

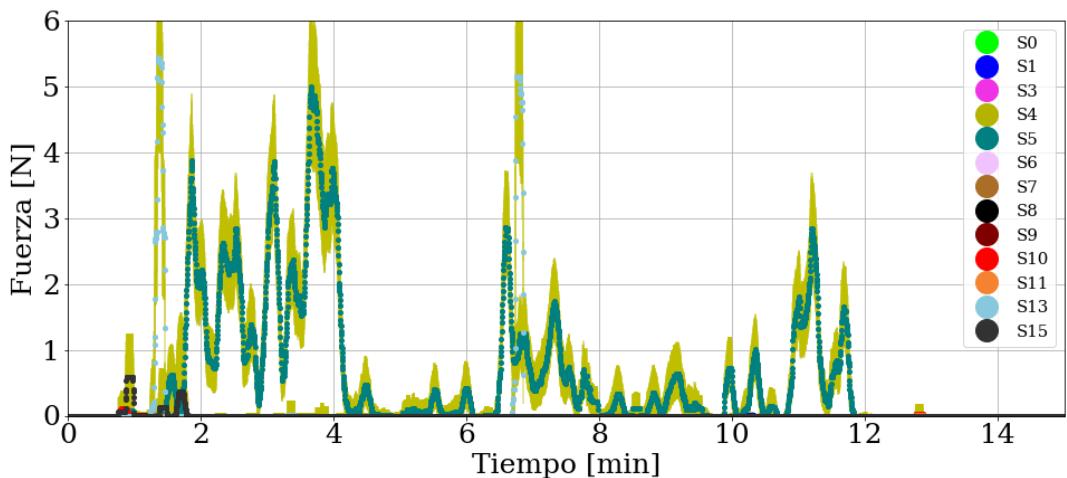


Figura 42: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo con un medias móviles con una ventana menor a dos segundos, para la primer medición en el subte C. Se muestran todos los sensores.

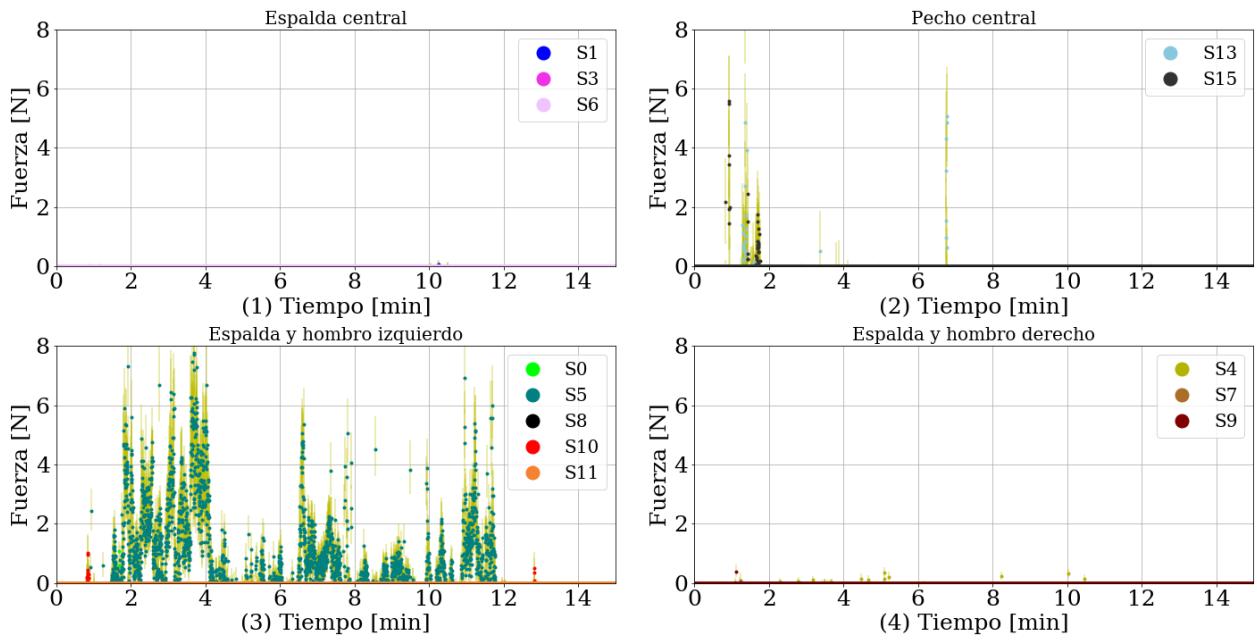


Figura 43: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la primer medición en el subte C.

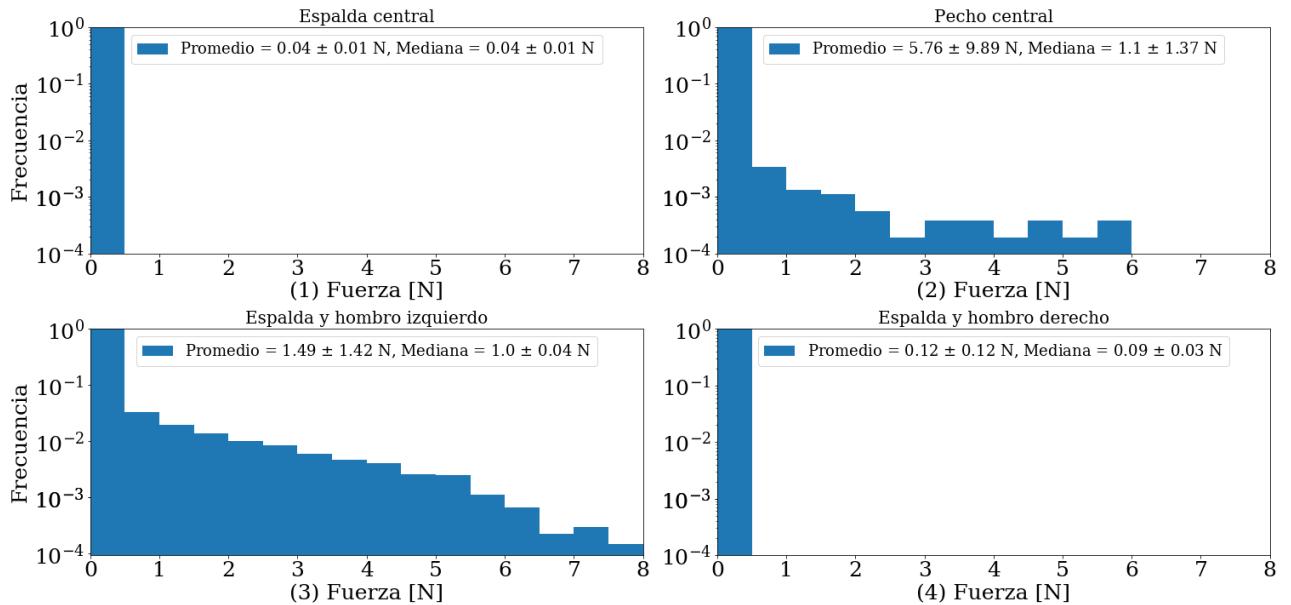


Figura 44: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

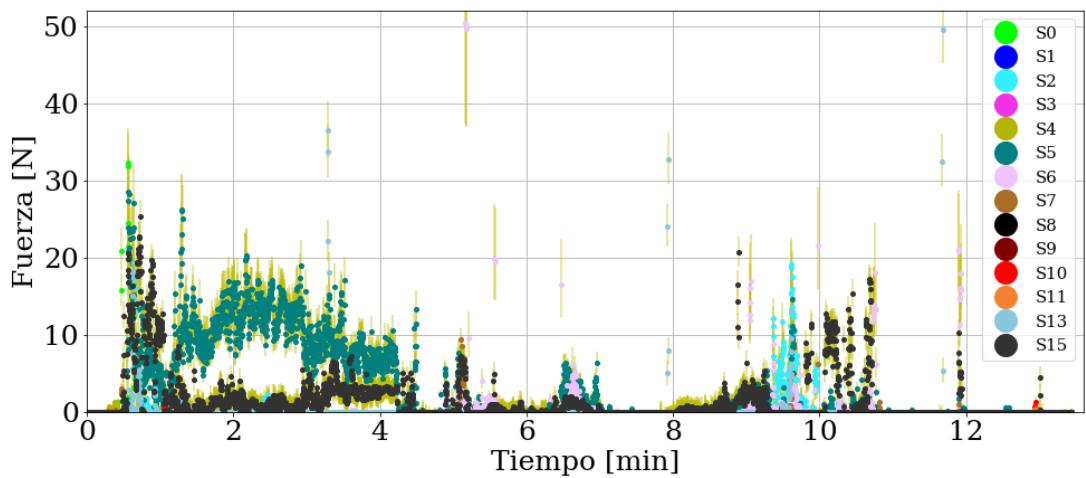


Figura 45: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo para todos los sensores para un viaje en el subte C a la hora pico en la mañana.

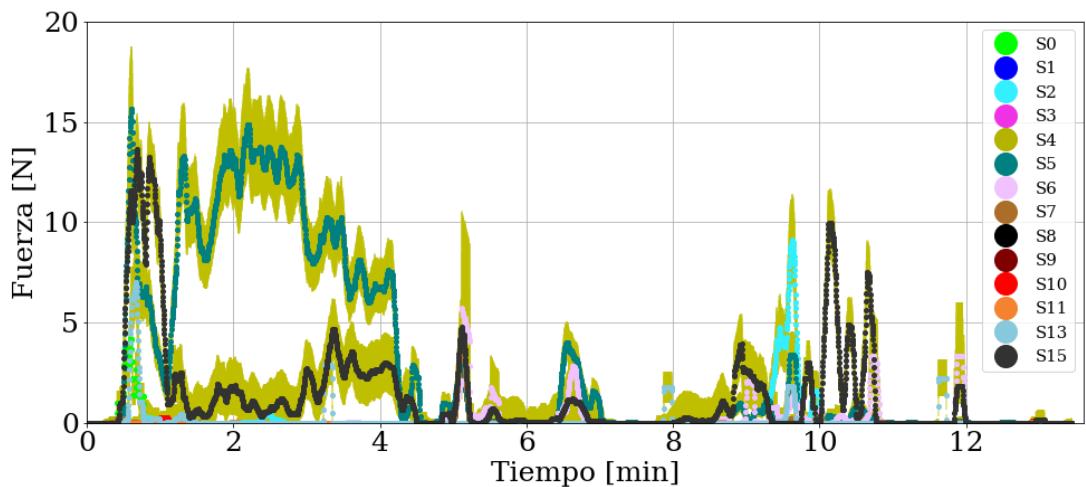


Figura 46: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo con un medias móviles con una ventana menor a dos segundos, para la primer medición en el subte C. Se muestran todos los sensores.

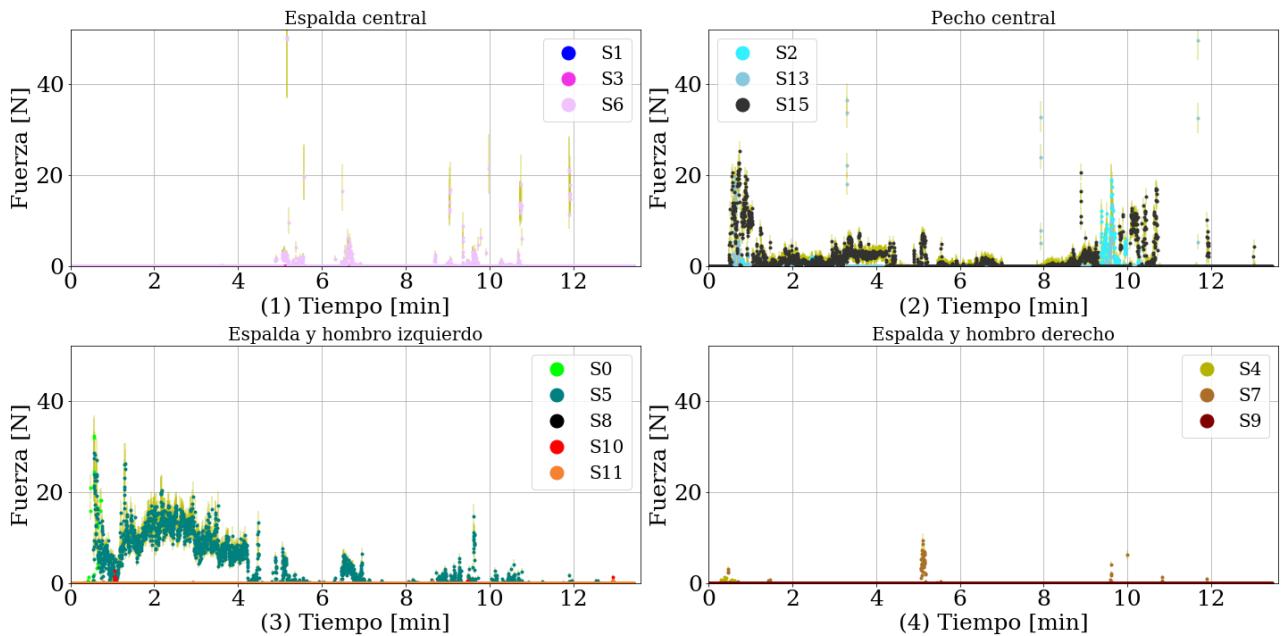


Figura 47: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la primer medición en el subte C.

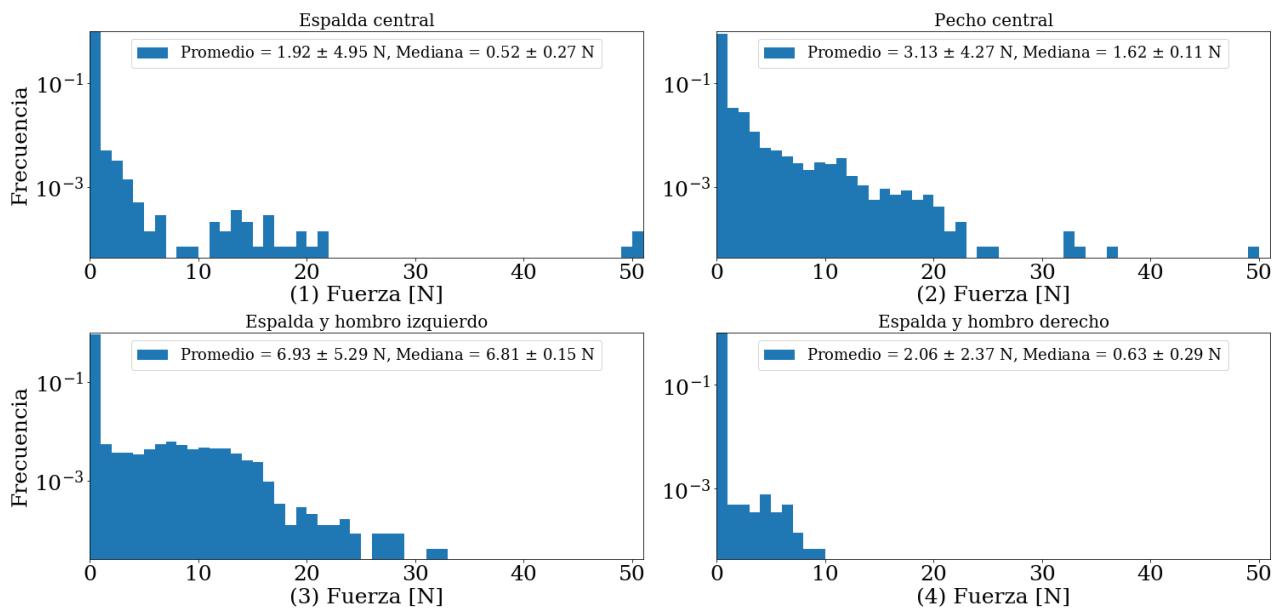


Figura 48: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

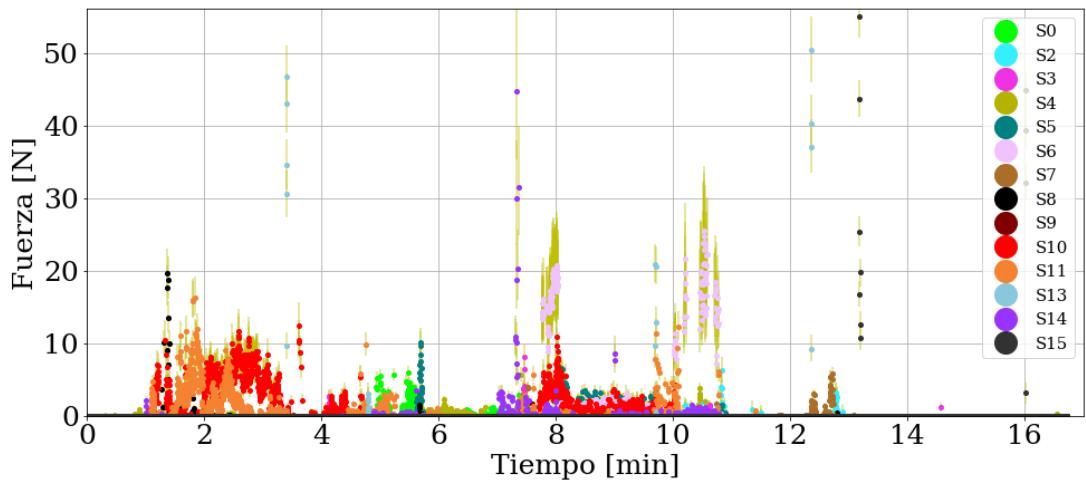


Figura 49: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo para todos los sensores para un viaje en el subte C a la hora pico en la mañana.

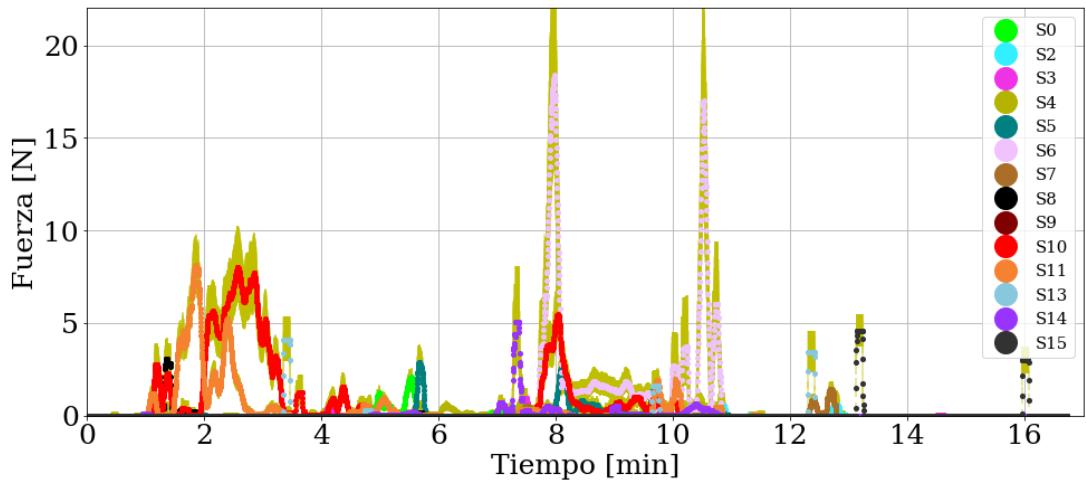


Figura 50: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo con un medias móviles con una ventana menor a dos segundos, para la primer medición en el subte C. Se muestran todos los sensores.

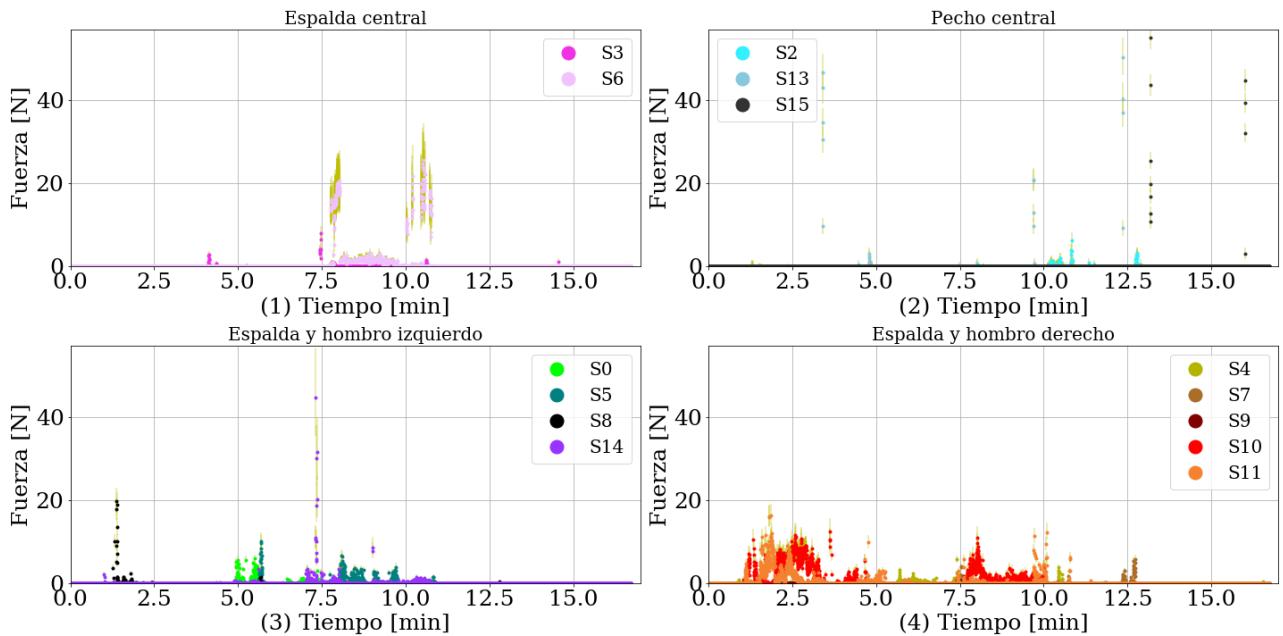


Figura 51: Gráfico de las fuerzas en función del tiempo separando las zonas del cuerpo donde se midió para la primer medición en el subte C.

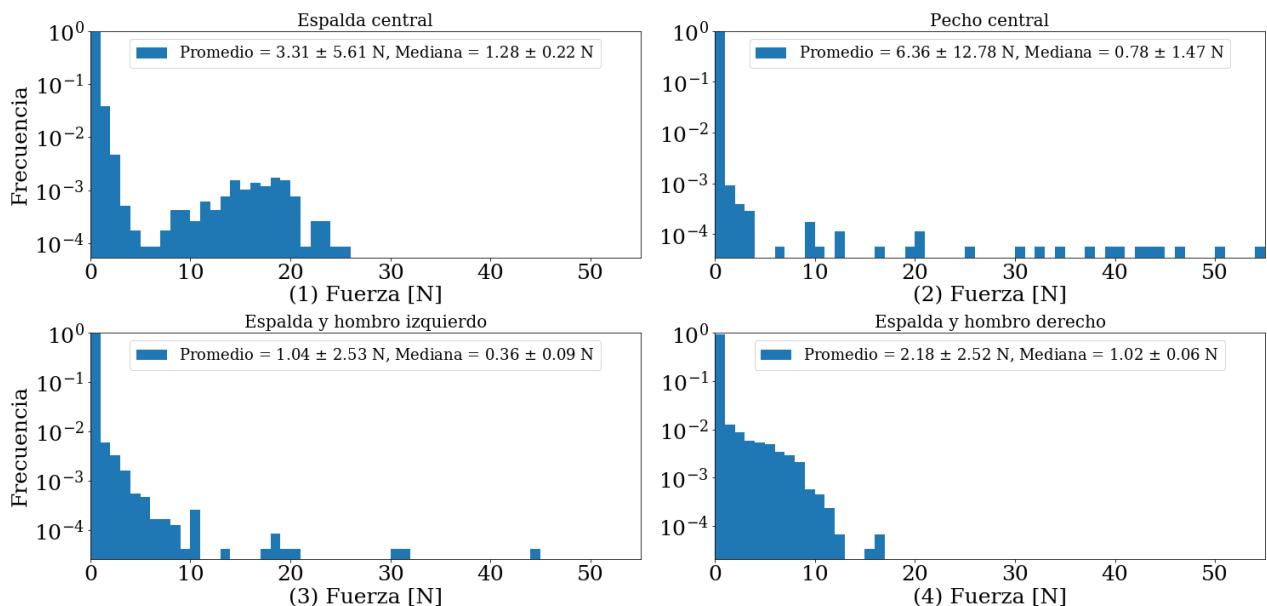


Figura 52: Histogramas para las fuerzas en cada volumen, en la configuración estática.

Sensor	R_{aux} [kΩ]	Sensor	R_{aux} [kΩ]	Sensor	R_{aux} [kΩ]
Circular	0	6	568 ± 2	13	564 ± 2
	1	7	563 ± 2	14	565 ± 2
	2	8	563 ± 2	15	100 ± 1
	3	9	563 ± 1	Cuadrado	67 ± 0,1
	4	10	565 ± 1		67 ± 0,1
	5	11	562 ± 1		67,2 ± 0,1
		12	565 ± 2		

Cuadro 3: Resistencias utilizadas R_{aux} para todos los sensores utilizados en el dispositivo.

Nº	Género	Edad	Altura (m)	Peso (kg)	Ancho de omóplato (cm)	Perímetro elipse (cm)
1	M	22	1,84	66,8	37	85
2	F	24	1,52	65	36	90
3	M	24	1,71	65,7	41	80
4	F	23	1,63	60,6	39	84
5	M	24	1,75	68,2	41	85,5
6	F	24	1,55	55,7	32	82
7	M	26	1,74	65,5	39	86,5
8	M	25	1,88	93,4	42	96
9	F	28	1,55	47,2	34	75
10	M	29	1,7	70,8	37,5	91
11	M	21	1,73	68,8	44	90
12	M	29	1,65	58,1	39,5	78
13	M	29	1,62	59,7	38	86
14	F	26	1,68	63	36	81
15	M	25	1,75	123	46,4	139
16	M	24	1,75	74,2	39	89
17	F	22	1,71	74	39	88
18	M	29	1,87	67,2	41	89
19	M	32	1,68	63,8	42	84
20	M	47	1,72	59	42	93
21	F	23	1,56	58,7	40	88
22	M	31	1,69	66,3	42	95

Figura 53: Datos de las personas que participaron en el experimento controlado. La persona Nº 16 resaltada fue la que utilizó voluntariamente el dispositivo.