CALIBRACIÓN DE TELÉFONOS INTELIGENTES PARA LA MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN DE ESPACIOS INTERIORES

Roberto G. Rodriguez (1); Valeria D. Paviglianiti (2); Clarisa Dumit (3); Andrea E. Pattini (4)

(1) Dr. Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente, Dis. Industrial, Investigador Adjunto CONICET, rgrodriguez@mendoza-conicet.gob.ar
(2) Arquitecta, Becaria Doctoral CONICET, vpaviglianiti@mendoza-conicet.gob.ar
(3) Esp. Docencia Universitaria, Dis. Industrial, Becaria Doctoral CONICET mdumit@mendoza-conicet.gob.ar
(4) Dra. Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente, Dis. Industrial, Investigadora Principal CONICET, apattini@mendoza-conicet.gob.ar

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE – CONICET), Centro Científico y Tecnológico Mendoza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET, Av. Ruiz Leal s/n-Parque Gral. San Martín, Cod. Postal 5500, Mendoza, Argentina, Tel.: 0054 (0261) 5244345

RESUMEN
El objetivo de este estudio es proponer criterios de calibración que permitan minimizar el error en la medición de iluminancia utilizando teléfonos móviles, a partir de la comparación sistemática con un patrón áureo. Para ello se contrastaron los valores de iluminancia obtenidos con un luxómetro profesional como patrón áureo, con las lecturas de iluminancia de cuatro aplicaciones Android para la medición de iluminación, instaladas en dos dispositivos móviles, en 17 niveles de iluminancia, desde los 20 lx hasta los 10000 lx variando la distancia a una única fuente de iluminación (LED 24W 6000K, CRI>70). Se calculó el error de lectura directa por dispositivo y por aplicación, cuyos promedios se ubicaron entre 28,36% y 41,77%. La variabilidad inter-dispositivo e inter-aplicación observada no tuvo significación estadística. Luego se aplicaron dos criterios de calibración diferentes a los encontrados en la literatura: El primero de ellos por medio de un único factor de corrección, calculado a partir del valor medio del rango de iluminancia este estudio. Con este criterio se logró un error promedio de -0,45% (DS=1,60). El segundo criterio utilizó una función de potencia para ajustar los datos del dispositivo móvil al patrón áureo, lográndose un error promedio de -0,08% (DS=0,21). Los valores obtenidos mejoran los obtenidos por medio del criterio de ajuste al valor mínimo utilizado en estudios previos. Se discuten las ventajas y desventajas de ambos criterios de calibración y se finaliza dando consideraciones en relación al error tolerable en distintas situaciones prácticas. El objetivo es lograr con un dispositivo móvil, un error comparable al de un luxómetro de bajo costo.

Palabras clave: Aplicaciones móviles, medición iluminancia, teléfonos inteligentes, calibración

ABSTRACT
The objective of this study is to propose calibration criteria in order to minimize illuminance measurement errors using mobile phones, upon a systematic comparison with a gold standard. Readings from of a professional luxmeter were compared with the illuminance readings of four Android applications for lighting measurement, installed on two mobile devices, at 17 illuminance levels, from 20 lx to 20 lx. 10,000 lx varying the distance to a single light source (LED 24W 6000K, CRI> 70). The direct reading error was calculated by device and by application, whose averages were between 28.36% and 41.77%. There was inter-device and inter-application variability, which was not statistically significant. Then, two novel calibration criteria were applied: The first one was based on a single correction factor, which was calculated from the mean value of the illuminance range in this study. With this criterion, we achieved a mean error of -0.45% (SD = 1.60). The second criterion used a power function to adjust the data from the mobile device to the gold standard, achieving an average error of -0.08% (SD = 0.21). Our results were better than those obtained

through the minimum value criterion found in previous studies. We discussed the pros and cons of both calibration criteria, then we presented insights regarding the tolerable error for different practical situations. The goal is to achieve by means of a mobile device, an error comparable to the one obtained with a low-cost light meter.

Keywords: mobile apps, illuminance measurement, smart phones, calibration

1. INTRODUCCIÓN

El avance en las tecnologías de comunicación móvil ha hecho posible dispositivos cada vez más versátiles, potentes, ubicuos y asequibles. La funcionalidad de estos dispositivos se ha extendido desde la mera comunicación por audio o texto, hasta convertirlos un soporte fundamental de interacción entre personas, y entre éstas con sistemas y servicios digitales en diversos contextos no solo laborales sino sociales y recreacionales. Los teléfonos inteligentes fueron lanzados al mercado a finales de la década de 1990, sin embargo se popularizaron a través del I-Phone de Apple desde 2007, con sistema operativo propietario (IOS), interfaz amigable y pantalla táctil. En Argentina, el sistema operativo dominante es Android, de Google. En la actualidad, es esperable encontrar dispositivos -aún en segmentos de entrada del mercado- con sensores integrados de iluminación, sonido, movimiento, y cámaras de alta resolución. La práctica de la ergonomía no es ajena a este fenómeno, a partir del creciente número de aplicaciones específicas para dar soporte a la recolección y análisis de datos de interés para la ergonomía. Green & col. (2018) relevaron aplicaciones para los sistemas IOS (Apple) y Android (Google), encontrando herramientas para la medición de factores ambientales, confort térmico, carga postural, y carga mental. Según los resultados obtenidos por Lowe, Dempsey & Jones (2019) en una encuesta online dirigida a profesionales de la Ergonomía angloparlantes (n=428), entre el 24% y el 28% de los encuestados refirieron usar teléfonos inteligentes como herramientas en su labor profesional. Entre ellos, las aplicaciones de uso más frecuente se orientaban al levantamiento y traslado de cargas, Evaluaciones Ergonomicas, y Vibraciones mecánicas En relación a los factores ambientales, la medición de sonidos, iluminación y estrés térmico ocuparon el quinto, sexto y séptimo lugar en frecuencia de uso.

Utilizar teléfonos inteligentes como instrumentos de medición es una ventaja en la medida que éstos sean más baratos que los equipos específicos que busca reemplazar. Los relevamientos de iluminación laboral requieren conocer la cantidad de luz que llega al plano de trabajo desde las fuentes de iluminación ubicadas a una determinada distancia (Iluminancia medida en Lux o en Pie Candelas) por medio de un luxómetro, cuyo precio en nuestro mercado varía entre USD 100 y USD 800, dependiendo de su homologación, prestaciones y especificaciones. Ante la posibilidad de utilizar un teléfono inteligente como instrumento de medición en reemplazo de un luxómetro, surge una cuestión ineludible: ¿Qué tan confiables son los datos obtenidos? Toda medición está sujeta a errores, y si bien es posible minimizar el efecto de los errores sistemáticos y aleatorios, la metrología considera que es imposible conocer el valor real de lo que se mide (CIE, 2019). Por lo tanto, la confiabilidad de un instrumento de medición se determina en función del grado de incertidumbre sobre el valor real que es capaz de proveer ese instrumento. Por ello se realizó este estudio, para investigar la respuesta del sensor de luz de dispositivos móviles, en diferentes dispositivos con diferentes aplicaciones que actúan de interfaz.

2. OBJETIVO

Proponer criterios de calibración que permitan minimizar el error en la medición de iluminancia utilizando teléfonos móviles, a partir de la comparación sistemática con un patrón áureo (PA).

3. MÉTODO

En un espacio interior (reflectancias estimadas: piso=0,4; muros=0,6; techo=0,8) sin acceso a iluminación natural, con una única fuente de iluminación artificial, se contrastaron los valores de iluminancia obtenidas con un luxómetro LMT Pocket Lux 2 como PA, con las lecturas de iluminancia de cuatro aplicaciones Android, tres de ellas para la medición de iluminación, y la restante diseñada para conocer las características y estado de los distintos componentes de hardware del dispositivo móvil. Estas aplicaciones fueron instaladas en dos dispositivos móviles diferentes, en diferentes escenarios definidos por niveles decrecientes de iluminación. El luxómetro utilizado cuenta con certificado de calibración del fabricante, y pertenece a la clase B según la Norma DIN 5032-7 (2017), con una desviación del instrumento respecto a $V_{lambda} < 2,5\%$.

Como fuente de luz se utilizó una luminaria LED de embutir circular de diámetro 280 mm (24 W 6000 K, flujo luminoso 2000 lm, CRI > 70, apertura de haz 120º) posicionada de manera vertical. Para variar la cantidad de luz que impacta en el sensor del dispositivo móvil, se modificó la distancia lineal entre éste y la fuente, siguiendo la ley del cuadrado de las distancias. La figura 1 muestra el arreglo experimental.

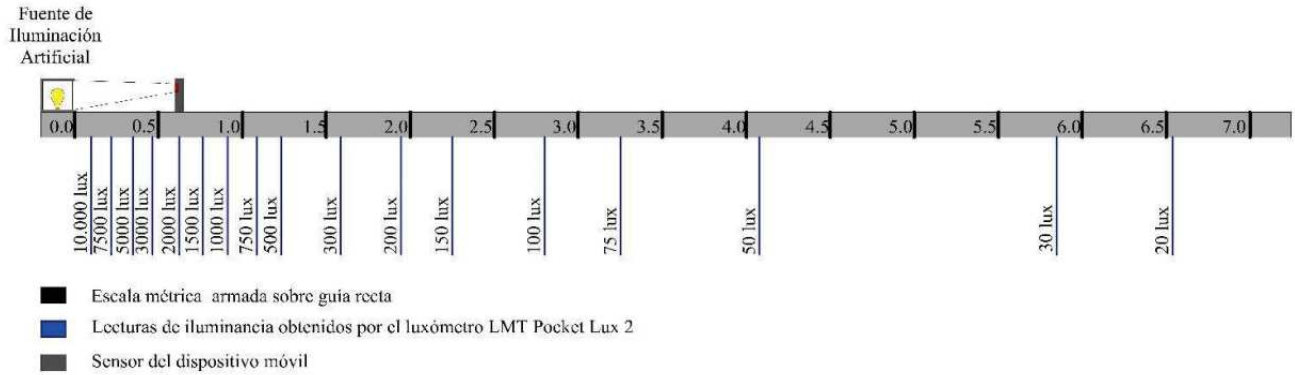


Figura 1. Esquema del arreglo experimental por medio del que se contrastaron los valores de iluminancia obtenidas por el luxómetro LMT Pocket Lux 2 y las aplicaciones instaladas en los smartphones.

Los escenarios luminosos siguieron los rangos de iluminancia mantenida dadas por la Norma EN 12464-1 (2011), que con un criterio psicofísico, indica saltos de iluminancia por un factor de 1,5 -mínima diferencia de iluminancia que el sistema visual puede percibir-. De este modo se obtuvieron 17 niveles de iluminancia (tabla 1), que a su vez pueden corresponder con las categorías de dificultad visual dadas por la normativa y legislación Argentina (IRAM AADL J 20 06; DR 351/79).

	A				B			C		D		E		F	G		
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	G1	G2	G3
E (lx)	20	30	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000	5000	7500	10000

Tabla 1. Definición de los escenarios luminosos por niveles de iluminancia según IRAM AADL 2006.

Los dispositivos móviles utilizados fueron: (i) LG Q6, (ii). MOTO G6 PLAY. El primero de ellos cuenta con una pantalla de 5,5 pulgadas de resolución 2160x1080 pixeles con una relación de aspecto de 18:9. Su procesador es Qualcomm Snapdragon 435 de 8 núcleos a 1,4 ghz y 3 GB de RAM, con sistema operativo Android Versión 7.1.1 Nougat. Su sensor de luz es un LG Light V2 con una resolución de 0,009995 lx y un rango máximo de 30000 lx. Por su parte, el segundo dispositivo cuenta con una pantalla de 5,7 pulgadas de resolución 1344x720 pixeles con una relación de aspecto de 18:9. Su procesador es Qualcomm Snapdragon 430 de 8 núcleos a 1,4 ghz y 3 GB de RAM, con sistema operativo Android Versión 8.0.0 Oreo. Cuenta con dos sensores de luz, siendo el principal un EPL259xALS/PS ALS con una resolución de 0,0010070801 lx y un rango máximo de 30000 lx.

En relación a las aplicaciones de medición de iluminancia se realizó una búsqueda en el PlayStore de Google a partir de las palabras clave “luxómetro” y “luxmeter”. Para la selección de aplicaciones se siguieron los criterios de inclusión/exclusión de Rodriguez, Dumit & Pattini (2019). La tabla 2 describe las aplicaciones seleccionadas, con datos correspondientes a febrero de 2021. Para cada aplicación se informa su desarrollador, fecha de lanzamiento, y de su última versión.

Nombre	**Desarrollador**	**Puntaje**	**Votos**	**Tamaño**	**Lanzado**	**Actualizada**
Lux light meter free	Doggo apps	4,7	20296	2,6	ene-17	feb-21 (V. 022.2021.02.17)
Medidor de luz	My Mobile Tools Dev	4,3	32836	4	ene-17	oct-19 (V. 1.5)
Luxómetro	Crunchy ByteBox	4,3	4089	1,7	oct-14	mar-16 (V. 2.0)
My Device- Device Info	3K Developers	4,3	24859	3,26	nov-16	feb-21 (V. 2.1.0)

Tabla 2. Descripción de las aplicaciones de medición de iluminancia seleccionadas

Por su parte, la Figura 2 muestra capturas de pantalla de las aplicaciones seleccionadas, tanto de su interfaz de lectura de iluminancia como la de calibración de iluminancia.



Figura 2 - Descripción de las aplicaciones de medición de iluminancia relevadas. De izquierda a derecha: Luxómetro Crunchy ByteBox: Lux Light Meter Free; Luxómetro My Mobile Tools: My Device-Device Info

A partir de la comparación entre el valor del luxómetro y el valor dado por la aplicación, se realizó la calibración según la Ecuación 1. Para el cálculo del error en las mediciones de las aplicaciones se trabajó con la ecuación 1 según Cerqueira y col. (2018):

Ec.1 **Error** = $[(E_{app} - E_{lux}) / E_{lux}] \times 100$ Donde: E_{lux} =Iluminancia de referencia tomada con el luxómetro [lx]
E_{app} =Iluminancia tomada con la aplicación. [lx]

4. RESULTADOS

Se calculó la correlación entre las lecturas de iluminancia del luxómetro y de los smartphones, por dispositivo y por aplicación, encontrándose correlaciones positivas perfectas, todas estadísticamente significativas (rho=1, p<0,001). Esto significa que en el punto de partida, el hardware de los dispositivos móviles incluidos en este estudio y las aplicaciones analizadas son sensibles a las variaciones de iluminancia en la misma dirección que el patrón de referencia.

La tabla 3 muestra el error por aplicación y dispositivo, previo a aplicar calibración. Para la aplicación Crunchy Box tanto en el LG Q6 como en el GP6 se observa que los valores obtenidos se ubican consistentemente por encima del PA. Para el primer dispositivo, el error promedio fue de 29,12% (DS=8,31), mientras que para el segundo dispositivo se registró un error medio de 37,58% (DS=16,65). En relación a la aplicación Doggo, los valores obtenidos también se ubicaron en ambos dispositivos por encima del PA. Para el dispositivo LG Q6 el error medio fue 28,36% (DS=9,06) mientras que para el MOTO 6GP fue de 35,15% (DS=19,48). En relación a la aplicación Mobile Tools el error promedio en el dispositivo LG Q6 fue 30,70% (DS= 9,60) mientras que para el MOTO G6P fue de 34,39% (DS=15,49). Nuevamente los valores obtenidos por el dispositivo móvil fueron superiores al PA. Finalmente, para la aplicación My Device en el dispositivo LG Q6 el error ascendió a 30,90% (DS=11,94) mientras que para el MOTO G6P el error fue 41,77% (DS=18,16).

Independientemente del dispositivo y la aplicación, todas las lecturas fueron mayores al patrón áureo. Considerando los datos obtenidos, por dispositivo (i.e. comparando el promedio de las lecturas de las cuatro aplicaciones entre el Q6 y el G6P), se observa que el Dispositivo LG Q6 mostró iluminancias un 20,42% mayores al PA, mientras que con el MOTO G6P las lecturas obtenidas fueron un 21,77% mayores. En ese mismo sentido, los datos obtenidos, por aplicación (i.e. promedio de las lecturas de cada aplicación en ambos dispositivos) dieron los siguientes resultados: La aplicación MYDEV presentó en lecturas 23,20% mayores al PA; CRUNCHY 22,16% mayores; MYMOBILE 20,94% mayores, y finalmente la aplicación DOGGO con 18,07% mayores. El rango de 100 a 1000 lux fue de consistentemente el que mayor error presentó, con lecturas promedio de 43,11% superiores al PA. Cabe destacar que en este rango se encuentra la mayoría de los escenarios de iluminación interior. Por su parte, el rango inferior (20 a 75 lx) mostró lecturas 30,17% superiores mientras que en el rango superior (1500 a 10000 lx) el error promedio fue de 25,71%. En términos estrictamente de estadística descriptiva, el mayor error lo presentó la aplicación MYDEV en el dispositivo G6 y el menor correspondió a la aplicación DOGGO en el dispositivo Q6.

	CBOX		DOGGO		MOBILE		MYDEV	
	Q6	G6	Q6	G6	Q6	G6	Q6	G6
PA (lx)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)
20	20,00	10,00	15,00	10,00	15,00	10,00	15,00	10,00
30	16,67	26,67	20,00	23,33	20,00	26,67	23,33	26,67
50	32,00	46,00	30,00	42,00	32,00	50,00	32,00	88,00
75	30,67	36,00	32,00	70,67	34,67	42,67	36,00	42,67
100	37,00	61,00	35,00	48,00	35,00	50,00	39,00	52,00
150	32,67	60,00	35,33	48,00	33,33	52,67	41,33	52,67
200	42,00	62,50	38,50	61,50	42,00	62,50	44,50	52,50
300	37,67	55,00	39,00	49,33	40,00	34,00	42,33	52,33
500	30,80	37,00	34,40	29,20	40,60	44,20	33,60	41,40
750	32,27	39,33	33,33	46,93	39,87	33,07	43,73	47,47
1000	33,80	51,80	41,80	53,90	44,70	38,40	44,70	57,70
1500	34,73	33,33	26,80	26,60	28,93	27,67	29,27	41,20
2000	33,05	35,45	27,90	36,45	31,90	37,30	30,95	39,80
3000	29,70	25,57	24,77	24,13	26,60	31,73	25,70	33,60
5000	21,68	27,90	20,50	12,28	25,04	21,56	27,72	30,82
7500	17,80	21,73	12,89	8,83	16,97	17,31	9,64	27,11
10000	12,51	9,52	14,86	6,39	15,35	4,88	6,42	14,24
Media	**29.12**	**37,58**	**28.36**	**35,15**	**30.70**	**34,39**	**30.90**	**41,77**

Tabla 3. Resumen del error obtenido por aplicación y dispositivo sin calibración.

Para conocer la significación estadística de los resultados presentados hasta el momento se realizaron pruebas no paramétricas de Mann-Whitney. Se indagó si los resultados obtenidos en cada aplicación variaron en función del dispositivo móvil. Para la aplicación Cruchy Box, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre dispositivos móviles (U=126; Z= -0.155; p= 0.877). Iguales resultados se obtuvieron para las aplicaciones Doggo (U=143; Z= -0.025; p= 0.959), MT (U=143; Z= -0.052; p= 0.959), y MYDEV (U=137; Z= -0.528; p= 0.796). Es decir, las lecturas de iluminancia fueron independientes del dispositivo móvil en que se instaló la aplicación. En otras palabras, no se encontró variabilidad inter-dispositivos. Para el mismo dispositivo, se analizó si las distintas aplicaciones arrojaban lecturas diferentes en términos de significación estadística. Para ello se ejecutó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Para el dispositivo Q6, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre aplicaciones (Ji^2=0.038; DF=3; p=0.998). Similar resultado arrojó el análisis del dispositivo G6 (Ji^2=0.058; DF= 3; p=0.996). Es por ello que podemos afirmar que en este estudio, las lecturas de iluminancia obtenidas fueron independientes de la aplicación instalada. En otras palabras, no se encontró variabilidad inter-aplicaciones.

4.1 Calibración

Una diferencia fundamental con otros estudios publicados (Gutierrez-Martinez et al., 2017; Green et al., 2018; Cerqueira et al., 2018), es precisamente el análisis de la respuesta del dispositivo/aplicación, previo a la etapa de calibración. En aquellos, se realizó una comparación entre el valor medido por el dispositivo y el patrón áureo, en un nivel de iluminancia específico, y se definió un factor de corrección. Cerqueira et al. (2018) definieron este factor de corrección como:

Ec. 2 $\mathbf{FC} = E_{lux} / E_{app}$ Donde: *FC es el Factor de corrección*
E_{lux} *es la Iluminancia de referencia tomada con el luxómetro* [lx]
E_{app} *es la Iluminancia tomada con la aplicación.* [lx]

Una vez realizada esta calibración, procedieron a la medición de iluminancias con el dispositivo móvil en diferentes escenarios luminosos, para luego calcular el error. En nuestro caso, realizamos las mediciones con los dispositivos sin calibrar y analizamos las respuestas por dispositivo y aplicación. Luego, una vez

concluida la obtención de datos, ensayamos diferentes criterios de calibración. En esta sección presentamos los resultados de los dos criterios que arrojaron el mejor ajuste al PA. Se trabajó a partir de dos enfoques diferentes, en cada uno se definieron diferentes criterios de calibración. El primer enfoque es el ya abordado en la literatura, definiendo un único factor de corrección según la ecuación 2 y el segundo enfoque, en lugar de utilizar un único factor de corrección, se basa en lograr un ajuste de la respuesta de la aplicación/dispositivo a la respuesta del PA, por medio de una función matemática.

Para todas las funciones explicativas exploradas, el ajuste fue superior a R^2=0,99. Por lo tanto se considera suficiente a la función lineal para explicar la respuesta de iluminancia de las aplicaciones y dispositivos móviles incluidos en este estudio. A modo de ejemplo, la figura 3 muestra los valores de iluminancia obtenidos con la aplicación Crunchy Box en el dispositivo Q6, junto a la curva de ajuste, ecuación y coeficiente de determinación resultantes para cada una de las funciones exploradas.

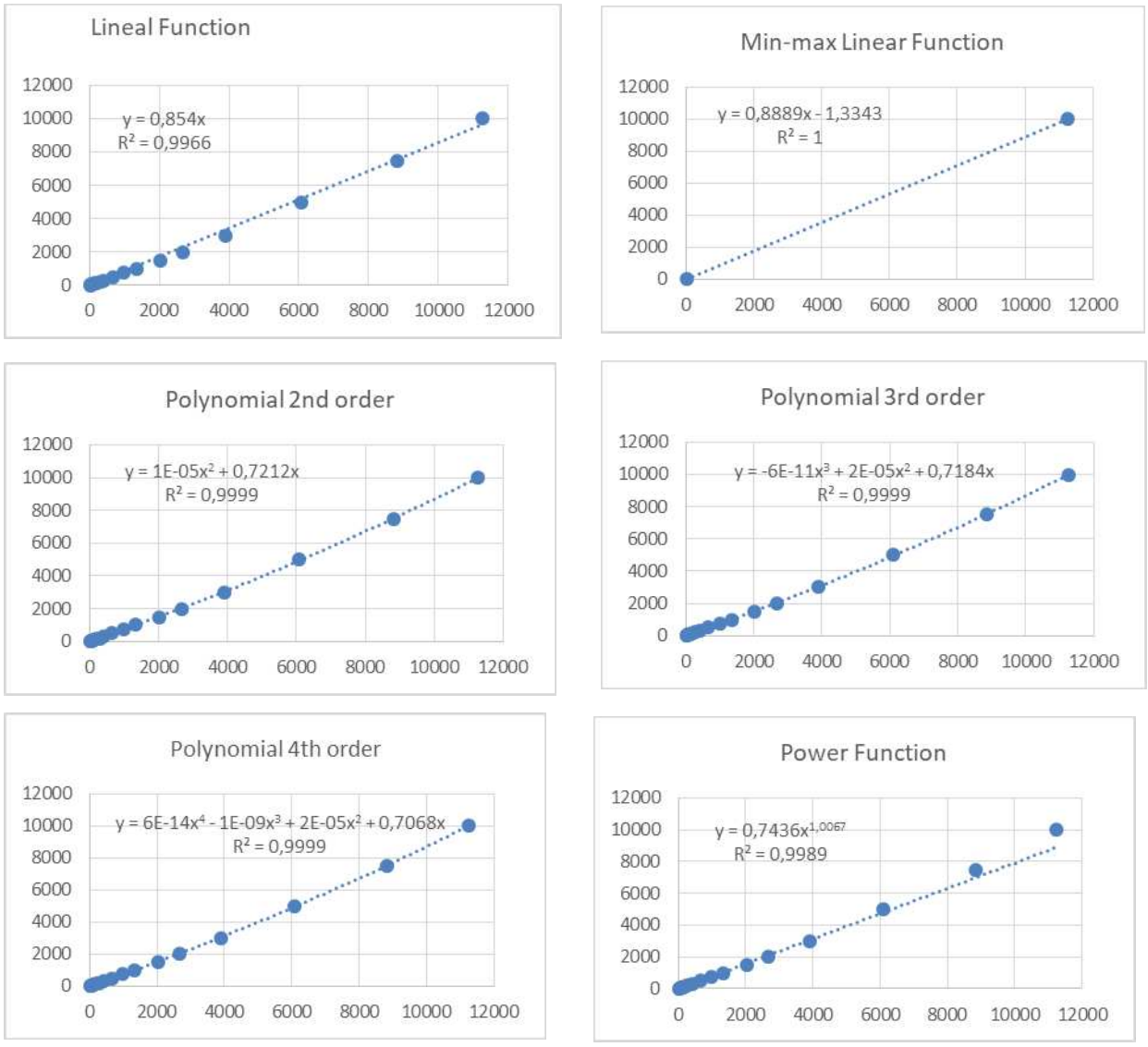


Figura 3- Curvas de ajuste, ecuaciones y coeficientes de determinación de las funciones exploradas para la combinación Crunchy Box/Q6.

De los ensayos de diferentes criterios de calibración se seleccionaron los resultados de los dos criterios que arrojaron el mejor ajuste al PA:

C3 – Factor de calibración en el valor promedio del rango de GS (1892,65 lx →2000 lx). Este criterio se basa en un único factor de corrección, a partir de un valor específico de iluminancia aplicando la ec.2. En la literatura este factor se calculó a partir de un nivel de iluminancia bajo (Gutierrez-Martinez et. al., 2017;

Green et al., 2018; Cerqueira et al., 2018), lo que llevó a estos autores a asociar mayores errores a iluminancias mayores. Sin embargo, observando el comportamiento de las curvas de respuesta obtenidas en este estudio y en base a nuestro propio estudio preliminar (Rodriguez et. al., 2019) nuestra hipótesis es que el mayor error reportado en la literatura no se debe al nivel de iluminancia, sino a la distancia de cada lectura a la iluminancia de calibración. Por ello, proponemos seleccionar una iluminancia de calibración que minimice esa distancia, tomando como referencia medidas de tendencia central. Se busca minimizar la distancia de cada lectura al nivel de calibración. Por ello este criterio toma al escenario luminoso más cercano al promedio de iluminancias de todos los escenarios de este estudio.

C11 - Función Potencia: Este criterio, en lugar de utilizar un único factor de corrección, se basa en lograr un ajuste de la respuesta de la aplicación/dispositivo a la respuesta del PA, por medio de una función matemática. La función seleccionada (ec.3) es una función de potencia, que presentó un ajuste promedio de R^2=0,9973 (SD=0,001):

ec.3 $\mathbf{E_{cal}}=aE_{dis}^{n}$ Donde: *Ecal es la iluminancia calibrada [lx]*
Edis es la iluminancia del dispositivo sin calibrar [lx]

La tabla 4 muestra los resultados por aplicación y por dispositivo, de ambos criterios propuestos, que mejoran los obtenidos por Green y Col. (2018), que reportaron un error medio de 35,2% en su estudio de campo con iluminancias en un rango de 150 a 550 lx. Gutierrez-Martinez y col (2017) desarrollaron una aplicación para la medición de iluminación obteniendo un error absoluto de 38,9% en un rango de 50 a 700 lx. Luego, mediante un proceso de calibración con tres coeficientes lograron reducir el error a 8,4%. Por su parte, Cerqueira y col. (2018) evaluaron 14 aplicaciones en 4 escenarios diferentes, de 300 a 1000 lx, con un escenario de calibración a 100 lx. El error promedio reportado en dicho estudio para todos los escenarios fue de 24,9%, siendo notoria la dispersión entre las mediciones de las aplicaciones, con errores de entre -78% a 439% en un mismo escenario. Una diferencia destacable en nuestro estudio, es que nuestro rango de medición fue mayor entre 20 y 10000 lx.

Criterio		CBOX		DOGGO		MOBILE		MYDEV		Total
		Q6	G6	Q6	G6	Q6	G6	Q6	G6	
C3	Media	-2,96	1,57	0,36	-0,95	-0,91	-2,12	-0,04	1,41	-0,45
	DS	6,24	12,29	7,08	14,28	7,28	11,28	9,12	12,99	1,60
C11	Media	0,01	0,01	-0,04	-0,46	0,11	-0,32	-0,10	-0,17	-0,08
	DS	6,31	11,58	6,85	13,19	7,30	10,60	8,80	12,31	0,21

Tabla 4. Resumen de la implementación de los criterios de calibración por aplicación y dispositivo.

En relación al criterio C3, asociado a estadísticos de tendencia central, se refuerza nuestra hipótesis de que el error se asocia a la distancia desde el nivel de calibración. En efecto, el error promedio de todas las aplicaciones y dispositivos fue de -0,45%. Este excelente desempeño no sólo puede explicarse porque se minimizó la distancia entre el nivel de calibración, sino también porque el niveles para el que se calculó el factor de corrección, fue aquel donde la respuesta de los dispositivos presentaba una desviación mayor respecto al PA. Una ventaja de utilizar un único factor de corrección, es que sólo requiere la medición de un solo valor de referencia.

En relación al criterio C11, requiere de tres a infinitos puntos de referencia. Es evidente que a mayor cantidad de mediciones, mejor ajuste tendrá la curva. Resta determinar en este análisis de datos, la cantidad mínima de mediciones necesarias para lograr una función matemática capaz de predecir los valores de iluminancia con un error menor al criterio C3, basado en una sola medición. La calibración por medio de una función potencia logró un error de -0,08%, mejorando el desempeño del criterio basado en el nivel promedio (C3) y mostrando además una menor dispersión de los errores en todo el rango, con una DS=0,21 contra una DS=1,60 del C3. El criterio C11 entonces, se posiciona como el más adecuado cuando se quiere alcanzar el máximo de confiabilidad en las mediciones en un rango amplio de iluminancias, lo que justificaría la obtención de varias lecturas de iluminancia para lograr la calibración.

Es evidente que hay mayor incertidumbre en relación al valor real de iluminancia cuando es medida con aplicaciones de dispositivos móviles respecto a un luxómetro. La siguiente cuestión a considerar es:

¿Cuánta incertidumbre se puede tolerar en la práctica? Si el relevamiento de iluminancia se realiza en el marco de una Evaluación Post Ocupacional (EPO) para verificar el cumplimiento de la legislación vigente, se asume que el valor medido es igual al valor real y no debería haber margen para la incertidumbre. Es por ello que las autoridades de aplicación solicitan adjuntar el certificado de calibración del instrumento. Si la iluminancia requerida es un valor específico, por ejemplo en la legislación Argentina 500 lux (según la tabla 2 del anexo IV del DR 351/79) y la medición arroja 499 lux, *in stricto senso,* no se está cumpliendo con la legislación. En estos casos Green y col. (2018) recomiendan un margen de error del 1%. Este requisito lo cumplen ambos criterios, C3 y C11, y también son válidos para los siguientes casos, de menor rigurosidad en términos de error admitido. Este es el caso cuando se busca conocer si la iluminancia se encuentra dentro de un rango, por ejemplo siguiendo con la legislación Argentina, las categorías de dificultad visual de la tabla 1 del Anexo IV del DR 351/79, situación en la que un 5% de error probablemente sea aceptable (Green y col., 2018). Si la situación no se encuadra en una verificación legal, como por ejemplo en estudios de preferencias o desempeño visual, el error puede alcanzar lo esperable para un luxómetro de bajo costo, esto es un 10%.

Esta cuestión no es menor: Existen distintas calidades de luxómetros. La norma DIN 5032 (DIN, 2014) provee los índices de calidad (e.g. ajuste general a V_{lambda}, respuesta direccional, linealidad) que son informados por el fabricante y que definen distintas categorías o clases de instrumentos de medición; de mejor a peor desempeño: L, A, B, C, D. Los equipos L y A son usados en mediciones de laboratorio, mientras que para la verificación de niveles de iluminancia generalmente se utilizan las Clases B o C. La clase D son todos los instrumentos que no pueden clasificarse en las categorías previas y no deben considerarse como adecuados más que para lecturas informativas (Fryc & Tabaka, 2019). Considerando la relación costo-beneficio, el uso de aplicaciones en teléfonos inteligentes para medir iluminación debería poder reemplazar a luxómetros Clase B o C.

En ese sentido, la calibración realizada en este estudio toma como referencia un luxómetro clase B, es decir, se parte de un patrón áureo imperfecto. Desde un punto de vista metrológico, el valor real del *mensurando* jamás podrá ser conocido, sólo es posible disminuir al mínimo deseable la incertidumbre sobre ese valor. Se debe reconocer que muy probablemente la medición de iluminación en espacios interiores en el ámbito profesional – e incluso en el ámbito académico – sea realizada con instrumentos de costo medio-bajo. Por otro lado, la selección de niveles de iluminancia tal y como es presentada en normas, reglamentaciones y recomendaciones no es una decisión únicamente científica sino que surge de un consenso de variados actores en un contexto (Boyce, 1996). Es por ello que se observa una tendencia enriquecer la búsqueda de una iluminancia objetivo como fin de un diagnóstico o diseño de iluminación interior, con otros criterios que permitan alcanzar calidad de iluminación y no sólo cantidad. Esto es evidente en la última edición del Handbook de la Illuminating Engineering Society of North America (DiLaura, Houser, Mistrick & Steffi, 2010) donde se reemplazaron las tablas de selección de iluminancia por una serie de criterios de diseño, que orientan a la selección de iluminancia. Por otro lado, marcos legales y normativos actuales ya incluyen esta tolerancia. Por ejemplo en la Norma ISO 8995 (2002) se incorpora una tolerancia del 10%, mientras que el Protocolo para la Evaluación de Luminancia e Iluminancia en los lugares de Trabajo (D025-PR-500-02-001) del Instituto de Salud Pública de Chile asigna una tolerancia del 20%. En el apartado tecnológico, se espera una mejora en los sensores de estos dispositivos. Se observa entonces un entorno favorable para la adopción de dispositivos móviles en reemplazo de luxómetros con una adecuada calibración, como la presentada en este estudio.

Dos cuestiones han quedado sin abordar en este estudio, indicadas en la Guía para la Expresión de Incertidumbres en la Medición (ISO, 1995), y son la repetitividad y reproducibilidad de la medición. La primera se resuelve tomando más de una medición en un lapso corto de tiempo en las mismas condiciones. La segunda se refiere a la replicación de la medición por otros grupos de investigadores. Para atender a la reproductibilidad, se espera a partir de la publicación de este artículo, la adopción de nuestros criterios de calibración.

5. CONCLUSIONES

Este estudio es la continuación de nuestra primera aproximación a la medición de iluminancias con teléfonos inteligentes. En este estudio contrastamos los valores de iluminancia obtenidas con un luxómetro LMT Pocket Lux 2-como patrón áureo- con las lecturas de iluminancia de cuatro aplicaciones Android para la medición de iluminación, instaladas en dos dispositivos móviles diferentes, en diferentes escenarios definidos por

niveles de iluminancia de 20 lx a 1000 lx. Observamos que el hardware de los dispositivos móviles incluidos en este estudio y las aplicaciones analizadas son sensibles a las variaciones de iluminancia en la misma dirección que el patrón áureo, e independientemente del dispositivo o aplicación, todas las lecturas fueron mayores al patrón áureo, sin variabilidad inter-dispositivos o inter-aplicación de significación estadística. La lectura directa sin calibración arrojó errores entre 28,36% y 41,77%. Luego se aplicaron dos criterios de calibración diferentes a los encontrados en la literatura: El primero de ellos por medio de un único factor de corrección, calculado a partir del valor medio del rango de iluminancia este estudio. Con este criterio se logró un error promedio de -0,45% (DS=1,60). Este resultado aporta evidencia de que el error reportado en la literatura no se asocia al nivel de iluminancia sino a la distancia desde el nivel de calibración. El segundo criterio utilizó una función de potencia para ajustar los datos del dispositivo móvil al patrón áureo, lográndose un error promedio de -0,08% (DS=0,21). Nuestros criterios lograron un mejor ajuste que los reportados en estudios previos, indicando que una adecuada calibración puede hacer factible el uso de aplicaciones en reemplazo de un luxómetro, al menos desde la clase B. El criterio C11 entonces, se posicionó como el más adecuado cuando se quiere alcanzar el máximo de confiabilidad en las mediciones en un rango amplio de iluminancias, lo que justificaría la obtención de varias lecturas de iluminancia -desde 3 hasta infinito- para lograr la calibración. Resta determinar cuál es la cantidad mínima de puntos de medición para que el criterio de ajuste a una función de potencia obtenga mejores resultados que un único factor de corrección, de más sencilla obtención. Estos resultados alientan a los autores ya que indican que es factible desarrollar un protocolo de calibración basado curvas de respuesta específicas por dispositivo, amigables para los usuarios. La evidencia obtenida permite ser optimista en cuanto a la utilización de dispositivos móviles para la medición de iluminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boyce, P. R. (1996). Illuminance selection based on visual performance—and other fairy stories. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, *25*(2), 41-49.

Cerqueira D, Carvalho F & Melo RB (2017). Is It Smart to Use smartphones to measure illuminance for occupational Health and Safety Purposes?. En International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (pp. 258-268). Springer, Cham.

CIE Division 2: Physical Measurement of Light and Radiation (2019). The Use of "Accuracy" and Related Terms in the Specifications of Testing and Measurement Equipment (Technical Note 009:2019). DOI:10.25039/TN.009.2019

Decreto Reglamentario 351 (1979). Reglamentación Ley 19587

DiLaura D, Houser K, Mistrick R & Steffy G (2010). The Lighting Handbook. Illuminating Engineering Society of North America.

DIN 5032-7 (2017). Photometry – Part 7: Classification of illuminance meters and luminance meters

EN 12464-1:2011. Iluminación de los Lugares de Trabajo. Lugares de Trabajo en Interiores

Green P, Cheydleur G, Li K, Deng R & Sanchez R (2018). Free smartphone apps to support human factors/ergonomics work. Ergonomics in Design, **26**(1): 4-16.

Gutierrez-Martinez J M, Castillo-Martinez A, Medina-Merodio J A, Aguado-Delgado & Martinez-Herraiz JJ (2017). Smartphones as a light measurement tool: Case of study. Applied Sciences, **7**(6): 616.

Instituto de Salud Pública (2015). Protocolo para la Evaluación de Luminancia e Iluminancia en los lugares de Trabajo (D025-PR-500-02-001). Chile.

IRAM AADL 20 06 (1972). Iluminacion artificial de interiores, niveles.

ISO (1995). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

33ISO 8995: 2002. Lighting of indoor work places.

Ley 19587 (1972) Ley de Higiene y seguridad en el trabajo. Argentina

Lowe BD, Dempsey PG & Jones EM (2019). Ergonomics assessment methods used by ergonomics professionals. *Applied ergonomics*, *81*, 102882.

Mills E & Borg N (1999). Trends in recommended illuminance levels: an international comparison. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, *28*(1): 155-163.

Negar N, Williams D, Schwartz J, Ahamed SI & Smith RO (2014). Smartphone-based light intensity calculation application for accessibility measurement. En Proceedings of the RESNA Annual Conference, Indianapolis, IN, EEUU (pp. 11-15)

Pattini A (2005). Recomendaciones de Niveles de Iluminación en Edificios no Residenciales: una comparación internacional. *AVERMA, 9:* 7-12.

Resolución 84 Superintendencia de Riesgos de Trabajo (2012). Protocolo para la medición de Iluminación en el ambiente laboral. Argentina

Rodriguez R, Monteoliva JM & Pattini A (2018). Aportes para la actualización de la reglamentación argentina en iluminación de espacios de trabajo. II Congreso Nacional de Ergonomía. Neuquén, Argentina.

Rodriguez R, Monteoliva JM, Dumit C & Pattini A (2017) Desarrollo de una aplicación de dispositivos móviles para la medición de iluminación en espacios de trabajo. II Congreso Iberoamericano de Ergonomía. Montevideo, Uruguay.

Rodriguez R & Monteoliva JM (2018). A Comparative Field Usability Study of two Lighting Measurement Protocols. International Journal of Human Factors and Ergonomics **5**(4): 323-343.

Rodriguez R, Dumit MC & Pattini A (2019). Medición de niveles de iluminación con teléfonos inteligentes. ¿Se puede reemplazar a un luxómetro?. VI Congreso Latinoamericano de Ergonomía. Buenos Aires, Argentina

Spreitzer R (2014). Pin skimming: Exploiting the ambient-light sensor in mobile devices. En: Proceedings of the 4th ACM Workshop on Security and Privacy in Smartphones & Mobile Devices, Scottsdale, AZ, USA; pp. 51–62.