

Efectos de la iluminación led en el coeficiente de luminancia

Pablo Ixtaina, Braian Bannert, Ayelen Gallardo

Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires LAL CIC¹, Argentina – <http://www.cic.gba.gov.ar/centros/otros-centros/lal/>
pixtaina@yahoo.com

Resumen—El trabajo analiza los efectos del espectro de la iluminación led en la reflexión de la luz sobre las calzadas. Tomando como eje la mejora de la Técnica de Luminancia para el alumbrado vial, se estudia la influencia del espectro de la luz incidente en el coeficiente de luminancia medio Q_0 , asimilable al “grado de claridad” de la calzada. Los resultados obtenidos permiten inferir cierta “selectividad espectral” en la reflexión de la luz blanca del led en las calzadas analizadas, pertenecientes a autopistas de zonas aledañas a la ciudad de Buenos Aires (Argentina). Esta “selectividad” se manifestó por un ligero incremento del coeficiente Q_{00} para instalaciones con iluminación led, frente a las mismas calzadas iluminadas por tradicionales lámparas de sodio alta presión.

El trabajo se complementa con mediciones de reflexión espectral de probetas de superficies de calzada, evaluadas para las condiciones de observación e iluminación estandarizadas.

Abstract—The effect of led light spectra on road surfaces reflection is analyzed in the present paper. The improvement of Luminance Technique for road lighting is the central orientation of this work and for that the influence of light spectra on average luminance coefficient Q_0 , which can represent the “road surface lightness”, was studied. The obtained results show a “spectral selectivity” for white led light in the analyzed road surfaces, belonging to Buenos Aires City (Argentina) motorways. This “selectivity” resulted in a slight increase of luminance coefficient Q_{00} for led lighting installations, compared with traditional high pressure sodium lamps installations.

Additionally, the work presents spectral road surface measurements on road samples, evaluated under standard observation and illumination conditions.

I. INTRODUCCIÓN

En alumbrado vial, la percepción visual del conductor está condicionada por la distribución de luminancias sobre la calzada de la ruta iluminada. En este modelo del fenómeno de visión, conocido como Técnica de Luminancia, las propiedades de reflexión de la superficie del camino se caracterizan por medio del coeficiente de luminancia “ q ”, factor de proporcionalidad, para cada punto de la calzada, entre su iluminancia y la luminancia reflejada en la dirección de observación. La integral del coeficiente de luminancia “ q ” sobre un ángulo sólido que subtienda a un elemento de calzada, se denomina coeficiente de luminancia medio Q_0 , factor útil para evaluar el grado de “claridad” de la superficie del camino.

El Q_0 del pavimento repercute directamente en la eficiencia energética de la instalación. Un pavimento “más claro” generará mayores luminancias en dirección al observador para una misma

distribución de iluminancias. Por ser Q_0 una propiedad determinada principalmente por el tipo de mezcla asfáltica o el tipo de hormigón, además de los métodos constructivos usados, su valor puede cambiar regionalmente o por zonas. Este efecto ya fue evidenciado para concretos asfálticos de una misma área, con diferentes compuestos o técnicas de aplicación [1]. Resulta entonces de interés estudiar si este “grado de claridad” puede cambiar con el espectro de la luz usada en el sistema de iluminación. Particularmente y a la luz de los cambios tecnológicos actuales, el presente trabajo se centrará en posibles efectos de “selectividad espectral” que influyeran la reflexión de la luz blanca del led.

A. Coeficiente de luminancia.

La luminancia L de una superficie elemental ΔS sobre la calzada (fig. 1), queda determinada por (1):

$$L = \frac{I(C,\gamma)}{H^2} q(\alpha, \beta, \delta, \gamma) \cos^3(\gamma) \quad (1)$$

$I(C,\gamma)$ es la intensidad luminosa de la luminaria en dirección al punto en el que se calcula la luminancia, H la altura de montaje de la luminaria y q es el coeficiente de luminancia del pavimento.

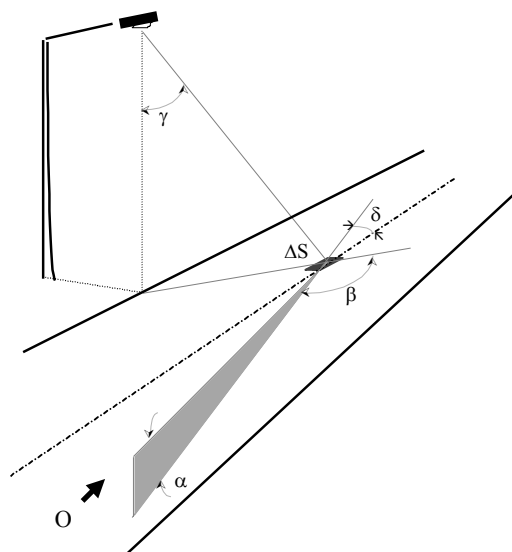


Fig. 1. Geometría básica para el análisis de la visión en rutas.

El coeficiente de luminancia depende enteramente de la su-

¹ Los autores agradecen a la CIC PBA, donde P.I. es miembro de la Carrera de Investigador Científico y Tecnológico, B.B. es profesional y A.G. es Becaria Interna.

perficie del camino: material de base, composición del aglutinante, método de aplicación, textura final, tiempo de uso, etc. Lejos de ser una constante, su valor depende de las posiciones del observador y de la fuente luminosa con respecto al punto que se considera. Los estudios demostraron que una simplificación válida es fijar los ángulos de observación: se ha estandarizado la línea de visión del conductor paralela al eje del camino ($\delta = 0^\circ$) y su elevación tal que incide sobre el punto de visión con una inclinación $\alpha = 1^\circ$. De este modo, las condiciones estandarizadas para visión en ruta consideran a q dependiente solo de β y γ [2].

Si E es la iluminancia puntual sobre la calzada, (1) puede reescribirse como:

$$L = q(\beta; \gamma)E \quad (2)$$

El coeficiente de luminancia cumple la función de factor de proporcionalidad, para cada punto de la calzada, entre iluminancia y luminancia. Con este sentido, se define el coeficiente de luminancia medio Q_0 , que cuantifica el grado de “claridad” de la superficie del camino:

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega_0} \int_{\Omega_0} q d\Omega \quad (3)$$

En (3), Ω_0 representa el ángulo sólido que subtende al elemento Δs de la fig. 1. Tal como se comentó en los párrafos precedentes, mayores valores de Q_0 , asociados con pavimentos más “claros”, permitirán obtener un incremento de la luminancia media, para un mismo sistema de iluminación (aumentando así la eficiencia de la instalación).

B. El coeficiente Q_{00}

Si se cuenta con una cantidad suficiente de evaluaciones simultáneas de luminancias e iluminancias puntuales en varias secciones de una vía de tránsito, es posible utilizar el factor Q_{00} , relación entre luminancia media e iluminancia media, como una aproximación empírica al grado de claridad de la calzada:

$$Q_{00} = \frac{L_m}{E_m} \quad (4)$$

Aunque no existe ninguna relación teórica entre las definiciones de Q_0 y Q_{00} , la baja dispersión obtenida en el análisis de un número importante de evaluaciones de luminancia e iluminancia, permite suponer un buen desempeño de este coeficiente como indicador del grado de claridad de la calzada [1,3].

El estudio descrito en [1] verificó diferencias de importancia en el “grado de claridad” de las calzadas de las autopistas de acceso y urbanas de la ciudad de Buenos Aires (Argentina). Dicho trabajo tuvo como base más de 300 evaluaciones simultáneas de luminancia e iluminancia, efectuadas en autopistas cercanas a la ciudad de Buenos Aires (Argentina), para el período 1998 -2012. Todas las mediciones se llevaron a cabo siguiendo procedimientos estandarizados según la recomendación argentina [4]. Las instalaciones estudiadas utilizaban lámparas de vapor de sodio alta presión y se respetaron las siguientes reglas:

- Los datos recabados se agruparon por tramos o secciones con el mismo tipo de asfalto (composición y técnica de aplicación).
- Se consideraron solamente períodos sin recapados o cambios de superficies.
- La instalación de alumbrado se mantuvo sin cambios para cada zona evaluada, exceptuando tareas de limpieza, reparaciones y cambios de lámparas.

La fig. 2 muestra un ejemplo de relación luminancia - iluminancia de una sección evaluada. Para los casos estudiados se evidenció una clara correlación $E - L$ que justificó la definición y el uso de Q_{00} .

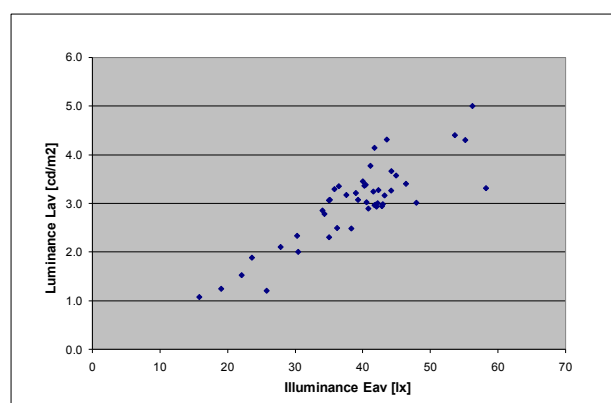


Fig. 2. Ejemplo de relación luminancia – iluminancia (extraída de [1])

Comparando las distintas secciones o tramos estudiados, pueden observarse diferencias sustanciales en el grado de claridad de sus pavimentos. Asimismo, el estudio muestra una notoria discrepancia entre los Q_{00} de los pavimentos reales y el Q_0 del pavimento estándar de la CIE R3, empleado como referencia casi exclusiva en los diseños locales. La fig. 3 resume los resultados obtenidos en el estudio citado. En ella, M1, M2, etc. corresponden a distintos sectores o autopistas con pavimentos homogéneos.

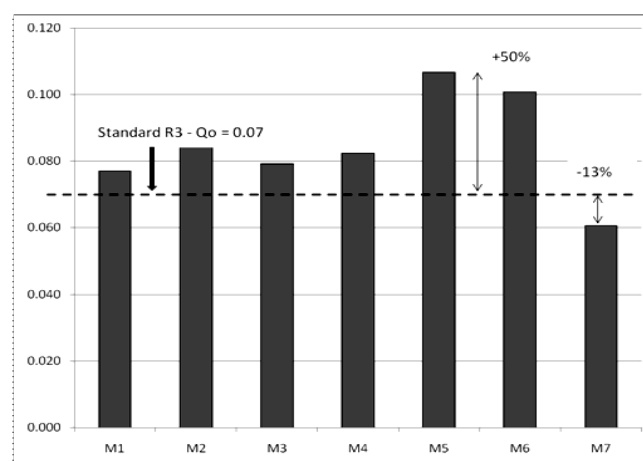


Fig. 3. Valores de Q_{00} (extraída de [1])

II. ESTUDIO DEL GRADO DE CLARIDAD

El presente estudio tiene como objeto verificar si existe algún cambio en el coeficiente de luminancia medio atribuible a la luz

blanca del led. En otras palabras, se busca algún tipo de selectividad espectral en la reflexión sobre la calzada.

A. Antecedentes.

Ekrias [5] estudió la reflexión espectral de once tipos de compuestos asfálticos de Finlandia, combinando muestras de superficies “naturales” y con agregados de pigmentos colorantes o para clarificarlos. Sus mediciones se basaron en muestras circulares, de 100 mm de diámetro, ángulos de incidencia $\beta=20^\circ$ y elevación $\gamma=55^\circ$. El ángulo de observación α fue de 35° , mayor al estándar CIE de 1° . La fig. 4 permite observar algunas de las muestras empleadas en dicha investigación. En la imagen se puede observar un tamaño de piedra importante, con una proporción de compuesto asfáltico aglutinante notoriamente menor a la de los pavimentos en uso en nuestro país. Asimismo, algunas de las muestras presentan una tonalidad rojiza, fruto posiblemente de los agregados colorantes.



Fig. 4. Muestras de pavimentos empleadas en [5]

La tonalidad mencionada se pone de manifiesto en los espectros obtenidos por Ekrias, que evidencian un ligero incremento en su reflectancia hacia la zona roja del espectro.

Los estudios de Adrian [6] muestran resultados similares. En este caso las muestras estudiadas fueron concretos asfálticos y hormigones, sin especificación del uso de algún tipo de agregado colorante. La fig. 5, extraída de [6] muestra un crecimiento en la reflectancia para longitudes de onda crecientes, similar al encontrado en [5].

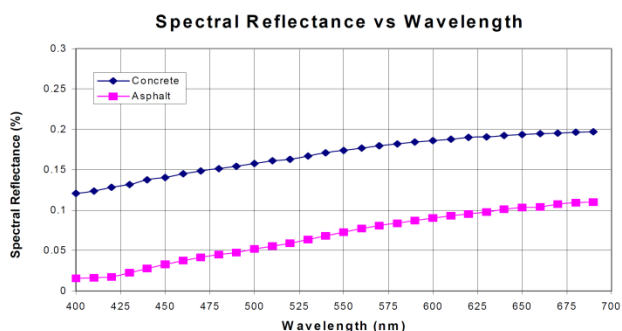


Fig. 5. Resultados de los estudios espectrales de Adrian.

Estudios americanos [7] exhiben un incremento en la reflectancia hacia el rojo mayor, más notorio en superficies desgastadas por varios años de uso (fig. 6). Es interesante notar la coincidencia entre estudios de lugares distantes (EEUU – Europa) pese a la alta influencia regional en la composición del pavimento y al uso o no de colorantes agregados.

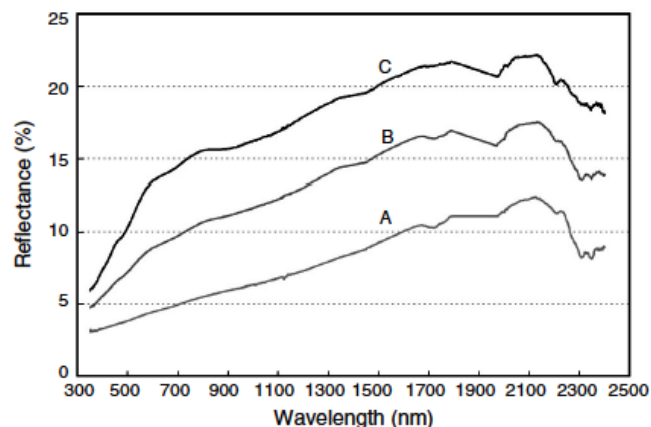


Fig. 6. Estudios Herol (EEUU). Pavimento C, con más de 10 años de uso.

B. Qoo con Iluminación Led

Siguiendo el modelo de experiencia descrita en [1], se analizaron mediciones simultáneas de luminancia e iluminancia en instalaciones de autopistas con iluminación led, extraídas de la base de datos del Laboratorio para el período 2013 – 2016. Los casos evaluados fueron instalaciones reconvertidas a led (15 áreas de medición) y pruebas de artefactos leds. Estas últimas se basaron en la medición de tramos “testigos”, conformados por el reemplazo de al menos las luminarias de 4 columnas consecutivas de un sector de autopista. El área de evaluación se ubicó en el vano central – 5 casos-). Todas las pruebas consideradas tenían su correlato con artefactos con sodio alta presión y se encontraban contabilizadas en el estudio [1]. Asimismo, se cuidó de incluir solo aquellas áreas de evaluación sin cambios extremos en la carpeta de rodamiento. La tabla 1 resume los casos analizados:

TABLA I
INSTALACIONES LEDS EVALUADAS

Autopista	Áreas evaluadas	Qoo (medio) [cd/m ² lx]	Incertidumbre estándar [cd/m ² lx]
La Plata Bs As Tramo1	8	0,0860	0,006
La Plata Bs As Tramo2	4	0,1080	0,010
Urbanas Bs As	6	0,0828	0,005
Panamericana	2	0,0640	---

Siguiendo [8], la incertidumbre estándar, considerando solo la atribuible a la componente tipo A, fue evaluada como:

$$\mu = \frac{\sigma n - 1}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Pese a que los casos considerados fueron acotados, la incertidumbre resultó del mismo orden de magnitud que en el estudio [1], por lo que las estimaciones de Qoo para iluminación led pueden considerarse representativas de cada tipo de pavimento. Una excepción a este comentario es el último caso, con solo dos mediciones, que se incluye solo a título ilustrativo.

C. Resultados

La fig. 7 muestra las relaciones luminancia media – iluminancia media, para cada una de las secciones estudiadas.

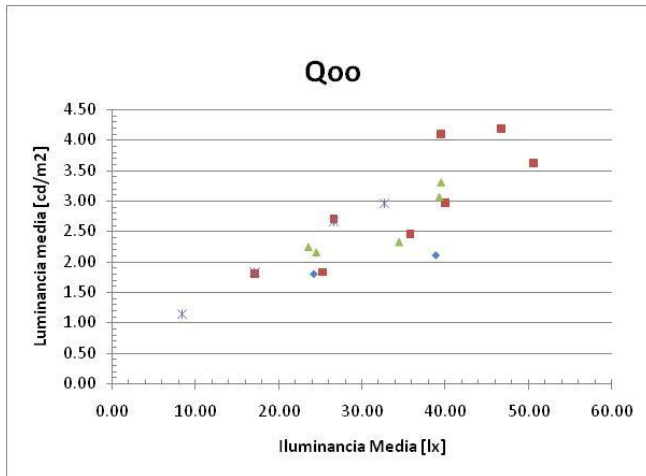


Fig. 7. Relación luminancia / iluminancia para los tramos leds estudiados.

Finalmente, en la fig. 8 se comparan, para cada zona, los valores de Q_{oo} obtenidos con iluminación tradicional (sodio alta presión) y las nuevas luminarias leds.

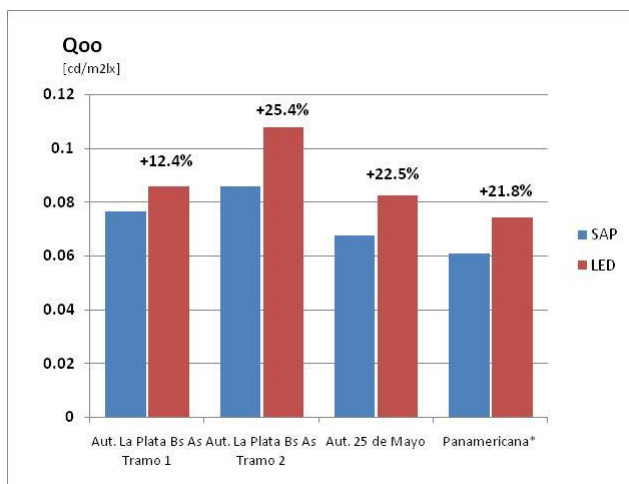


Fig. 8. Comparación del Q_{oo} obtenido para instalaciones con sodio alta presión y leds.

Los resultados obtenidos indican un aparente incremento en el “grado de claridad” de cada superficie de calzada para el espectro de la luz led. En un primer análisis, este resultado es coincidente con los antecedentes antes mencionados, al menos en el hecho cualitativo de influencia del espectro de la fuente en la reflexión media del pavimento, en otras palabras, que la reflexión no puede considerarse acromática. Sin embargo, el incremento de Q_{oo} para el espectro led no es coherente con la tonalidad “rojiza” de los pavimentos estudiados por Ekrias, Adrian y Herold, ya que el espectro predominantemente azul del led debería conducir hacia un resultado opuesto al encontrado en nuestro estudio. Coherente con este razonamiento, en [5] se menciona

una mejora en Q_{oo} de superficies iluminadas con lámpara de sodio, con respecto al mismo pavimento bajo luz blanca (mercurio alta presión).

Por otra parte, no podemos afirmar que los pavimentos europeos o estadounidenses de los estudios citados sean comparables a los actualmente en uso en Argentina y que fueron objeto del presente estudio. La fig. 9 muestra probetas de tales calzadas, del tipo “drenante”. Se puede observar una granulometría y color distintos de los presentados en la fig. 4. Está claro que la comparación entre fotografías tiene solo un relativo valor descriptivo, pero muestra para las superficies locales una densidad (al menos superficial) mayor de aglutinante y menor tamaño de piedras. Asimismo, las imágenes no muestran evidencias de tonalidades rojizas.



Fig. 9. Muestras (probetas) de superficies drenantes, similares a las calzadas de las autopistas estudiadas.

III. ESTUDIO ESPECTRAL

A. Esquema de medición

Se trabajó sobre una probeta, similar a las mostradas en la fig.9, de dimensiones estandarizadas para evaluación de muestras [2], montada en el equipo para la medición de la tabla-r del LAL (*Reflectómetro de muestras*). La fuente luminosa se ubicó en $\beta=0^\circ$, con tres ángulos de incidencia vertical: $\gamma = 0^\circ, 15^\circ$ y 30° .

El espectro reflejado por la muestra se registró con un espectrómetro Avantes Starline, AvaSpec 2048 [9], con ángulo de observación estándar CIE, $\alpha=1^\circ$.

La fig. 10 muestra un esquema del sistema de medición, las figs. 11 y 12 aspectos de la experiencia.

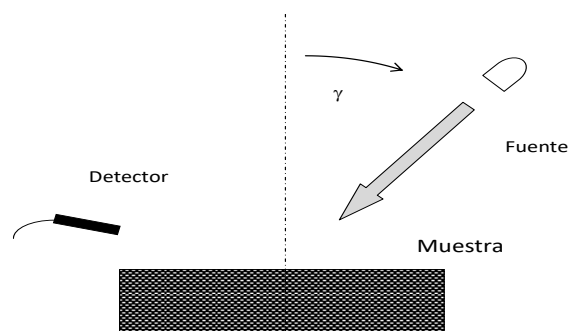


Fig. 10. Esquema del sistema de medición.



Fig. 11. Aspectos de la experiencia. Detector



Fig. 12. Aspectos de la experiencia. Muestra

Se compararon dos fuentes luminosas. Por un lado, una lámpara de sodio alta presión, del tipo tubular clara, cuyo espectro se muestra en la fig. 13.

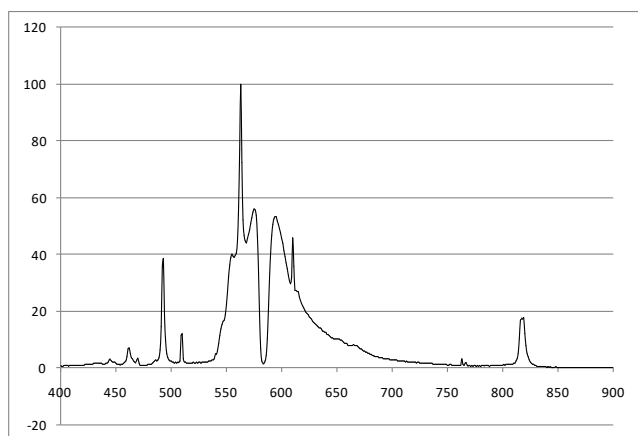


Fig. 13. Espectro de la lámpara SAP

Como fuente led se empleó una placa con componentes SMD, sin lente refractora, características cromáticas $x=0,362$, $y=0,366$, CCT= 4500 K. Su espectro se muestra en la figura 14.

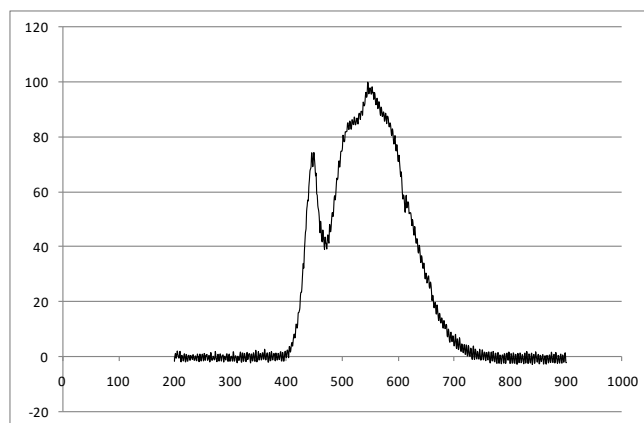


Fig. 14. Espectro de la fuente led.

B. Resultados

La comparación de los espectros directos y reflejados se efectuó a partir de re-escalarlos a valores porcentuales de sus respectivos máximos. La superposición de ambas curvas debería indicar (en el caso de no coincidencia) la zonas con diferencias en absorción espectral. La fig. 15 compara los espectros para lámpara SAP, con incidencia γ de 30° y es representativa de $\gamma 0^\circ$ y 15° . Se ha puesto énfasis en la región del espectro con mayores diferencias, destacándose la región 560-580nm y 590-630 nm, que presentan una absorción mayor que en el resto del espectro.

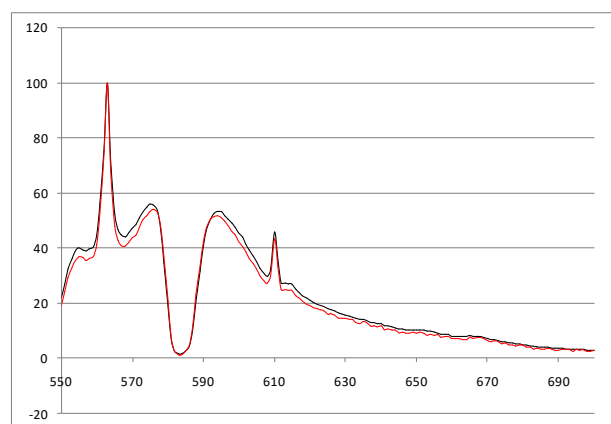


Fig. 15. Espectro directo y reflejado para SAP

En las zonas mencionadas, el cociente de ambas curvas (que debería centrarse en 1, por el re-escalado), tiene tendencia a situarse en la inmediaciones de 0,9, lo que indicaría una absorción un 10 % mayor en esta parte del espectro (fig. 16).

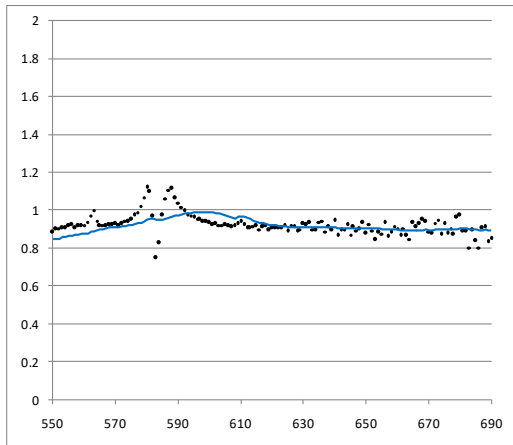


Fig. 16. Espectro reflejado/directo

La fig. 17 muestra superpuestos los espectros directos y reflejados para la fuente led. Exceptuando una pequeña diferencia en la región 450 – 500 nm y en torno a 650 nm, las diferencias son menores que para el caso del sodio. La fig. 18, que presenta la relación espectro reflejado a directo, muestra con más detalle este fenómeno.

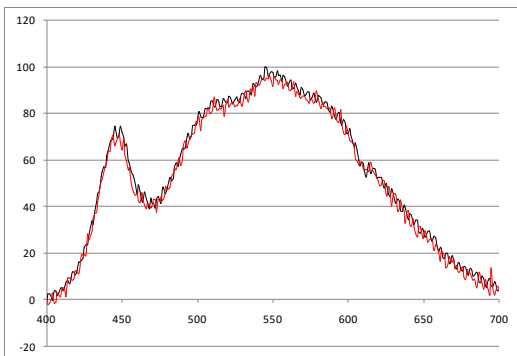


Fig. 17. Espectro reflejado/directo

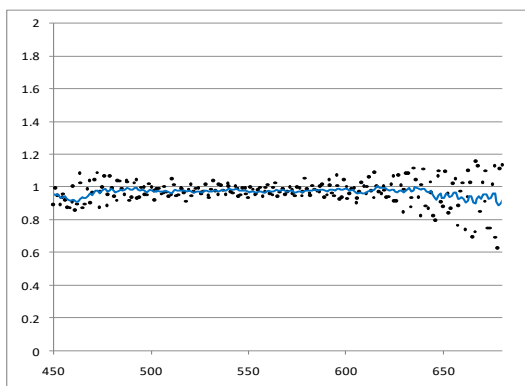


Fig. 18. Espectro reflejado/directo

Para valorar el efecto “fotópico” de estas diferencias y poder cuantificar con un número único, representativo de la reflexión media en la zona visible (valor válido solo para las condiciones de medición: $\alpha= 1^\circ$, $\beta= 0^\circ$ y $\delta= 30^\circ$), se calcularon los factores F1 y F2 proporcionales a la emisión y reflexión fotópica y defi-

nidos como:

$$F1 = \int Gdir(\lambda) V(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

$$F2 = \int Gref(\lambda) V(\lambda)d\lambda \quad (7)$$

En (6) y (7) $V(\lambda)$ es la curva de sensibilidad espectral normalizada del ojo y $G(\lambda)$ son los espectros medidos, “dir” directo y “ref” reflejado por la muestra en las condiciones ya mencionadas. La fig. 19 muestra a modo de ejemplo, $Gref(\lambda)$, $V(\lambda)$ y el producto, para el caso de lámpara de sodio.

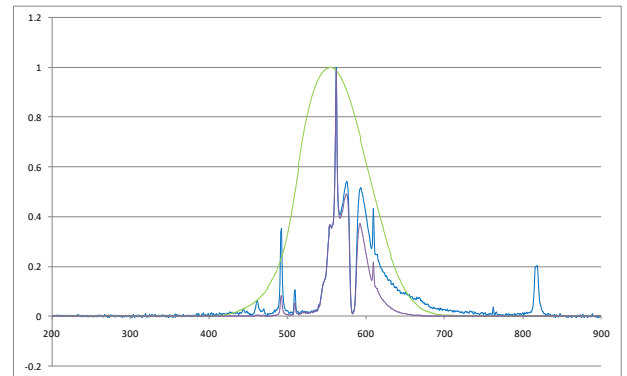


Fig. 19. Espectro SAP reflejado y curva $V(\lambda)$

La Tabla II resume los resultados de los cálculos realizados. Se observa una diferencia a favor del reflejo led (“ganancia”) cercana al 4% para el pavimento estudiado, para las condiciones de observación e iluminación ya enunciadas.

TABLA II
RESULTADOS COMPARACIÓN FOTÓPICA

Espectro	$F = \int G(\lambda) V(\lambda)d\lambda$	Diferencia relativa (F2-F1/F1)	Ganancia Reflejo led a sodio
Sodio directo	25,00	-5,92 %	3,8 %
Sodio reflejado	23,52		
Led directo	85,30	-2,12 %	
Led reflejado	83,49		

IV. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados son coincidentes con estudios previos realizados en este laboratorio y las investigaciones realizadas en Europa y EEUU en cuanto a la existencia de una suave dependencia del reflejo en calzadas con el espectro de la luz incidente. Esto implica una leve coloración hacia el verde rojo, que surge en todos los estudios a pesar de las diferentes técnicas de investigación empleadas y el tipo y composición de los asfaltos estudiados.

El estudio con calzadas reales, en uso en la zona metropolitana de Buenos Aires (Argentina) permitió correlacionar esta

“selectividad espectral” con un cierto incremento (ganancia) en el grado de claridad cuando se ilumina con leds frente al espectro del sodio alta presión. Las mejoras de Qo encontradas en autopistas resultaron del orden de un 20% promedio, mientras que en el estudio espectral sobre una muestra, el incremento pudo estimarse en alrededor de un 4%. Aquí debe mencionarse que en este último caso se trató de una muestra de un pavimento no necesariamente coincidente con los reales en uso actualmente. Sin embargo, la coincidencia en al menos la tendencia, indica que se deberá profundizar en estos estudios

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la CIC PBA, donde P.I. es miembro de la Carrera de Investigador Científico y Tecnológico, B.B. es profesional y A.G. es Becaria Interna.

REFERENCIAS

- [1] Ixtaina, Pablo R; Vidal, Pedro A., *Road Surface Lightness and Energy Efficiency in Road Lighting*, 12th European Lighting Conference “LUX EUROPA 2013, Poland, 2013.
- [2] Publication CIE N° 30-2 (TC-4.6), *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*. Vienna, 1982.
- [3] Ixtaina P, Armas A, Bannert B, *Use Effects on the Reflection of Macro Textured Surfaces*. Journal of Applied Engineering Sciences ISSN: 2247-3769 / e-ISSN: 2284-7197, VOL(6), ISSUE 1/2016, pp51-56, May 2016.
- [4] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM AADL J 2022-2, *Alumbrado Público, Vías de Tránsito – Clasificación y Niveles de Iluminación*. Buenos Aires, 1995J.
- [5] Ekrias A, Ylinen A, Eloholma M, Halonen L, *Effects of Pavement Lightness and Colour on Road Lighting Performance*. CIE International Symposium on road surface photometric characteristics: Measurement Systems and Results, Italy, 2008
- [6] Adrian W., Jobanputra R, *Influence of Pavement Reflectance on Lighting for Parking Lots*. Portland and Cement Association, PCA R&D Serial No 2458, 2005.
- [7] Herold, M. *Remote Sensing of Impervious Surfaces, Ch. 12 - Spectral Characteristics of Asphalt Road Surfaces*, Wageningen University, DOI: 10.1201/9781420043754, 2007.
- [8] International Organization for Standardization ISO, “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, Switzerland, 1993.
- [9] <http://www.avantes.com/products/spectrometers/starline>