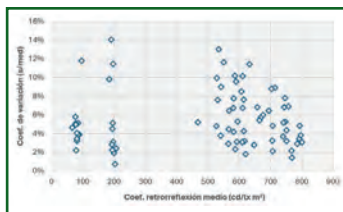


Intercomparación entre equipos estáticos y dinámicos para la obtención del coeficiente de retrorreflexión de la señalización vertical



Intercomparison study between static and dynamic equipment for measuring the retroreflection coefficient of vertical traffic signs

Miguel Ángel González Manchado

Jefe del Servicio de Proyectos

Dirección Técnica

Dirección General de Carreteras, MITMS

Adolfo Hoyos-Limón Cortés

ICCP

INECO

La visibilidad nocturna de la señalización vertical resulta fundamental para garantizar la seguridad de los usuarios que circulan por la carretera. El coeficiente de retrorreflexión es un parámetro directamente relacionado con la percepción de las señales y carteles en servicio bajo condiciones de escasa iluminación. Tradicionalmente, este parámetro, se ha determinado, mediante el uso de equipos estáticos cuyos rendimientos operativos son incompatibles con una auscultación sistemática a nivel de red. El avance de la técnica ha permitido el desarrollo de equipos que obtienen los datos de forma dinámica. Sin embargo, a nivel mundial, no existe ninguna norma que regule el empleo de sistemas de medida dinámicos.

Con el fin último de optimizar la gestión del estado de la señalización vertical de la Red de carreteras del Estado, la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras coordinó un ensayo de intercomparación, en 2024, entre los equipos estáticos y dinámicos de auscultación del coeficiente de retrorreflexión de la señalización vertical (incluida cartelería) para analizar el comportamiento de estos últimos. El presente artículo muestra los resultados del estudio realizado, profundiza en los factores de influencia de la medida del coeficiente de retrorreflexión obtenido con los equipos de alto rendimiento, e incluye una síntesis de los métodos de evaluación de la retrorreflexión actualmente disponibles y las características de los principales tipos de láminas retrorreflectantes.

Nighttime visibility of vertical signage is essential to ensure the safety of road users. The retroreflection coefficient is a parameter directly related to the perception of signs and panels in service under low-light conditions. Traditionally, this parameter, has been determined using static equipment, whose operational performance is incompatible with systematic network-level monitoring. Technological advancements have enabled the development of equipment that acquires data dynamically. However, at a global level, there is no standard regulating the use of dynamic measurement systems

With the ultimate goal of optimizing the management of the condition of vertical signage of the State Road Network, the Technical Directorate of the General Directorate of Roads coordinated an intercomparison test, in 2024, between static and dynamic equipment for inspection of the retroreflection coefficient of vertical signage (including gantries). The purpose was to analyze the performance of dynamic systems. This paper presents the results of the study conducted, examines the influencing factors of the retroreflection coefficient measurements obtained with high-performance equipment, and provides a summary of the evaluation methods currently available for retroreflection and the characteristics of the main types of retroreflective sheets.

1. Contribución de la retroreflexión a la visibilidad nocturna

La señalización vertical desempeña un papel fundamental en la seguridad vial, ya que orienta, informa y regula el comportamiento de los conductores en las vías. Sin embargo, su eficacia depende en gran medida de su visibilidad, especialmente durante la noche o en condiciones de baja iluminación. En estos contextos, la retroreflexión de los materiales utilizados en las señales se convierte en un elemento esencial para garantizar que la información vial pueda ser percibida de forma clara y oportuna.

La retroreflexión es una propiedad óptica mediante la cual una superficie refleja la luz en la misma dirección de la que proviene, es decir, hacia la fuente luminosa. En el caso de la señalización vial, esto significa que la luz emitida por los faros de los vehículos se refleja de vuelta hacia el conductor, permitiendo que las señales sean visibles especialmente durante la noche. Los materiales retroreflectantes dirigen el haz luminoso hacia el punto de origen, lo que aumenta notablemente la eficacia visual de la señalización vertical.

Durante la conducción nocturna, la capacidad visual del ser humano disminuye considerablemente. El campo de visión se reduce, la percepción de profundidad es menor y el tiempo de reacción ante un estímulo visual aumenta. En este contexto, la retroreflexión proporcionada por la señalización vertical ayuda a compensar estas limitaciones fisiológicas al proporcionar una detección temprana y clara de la información vial, como límites de velocidad, advertencias de curvas o indicaciones de sentido de circulación. Esto permite a los conductores

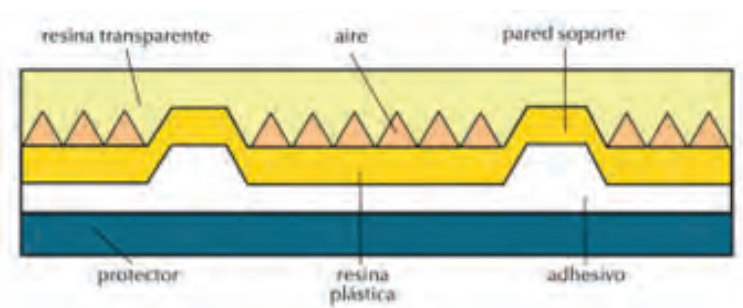


Figura 1. Sección transversal de una lámina microprismática. Fuente: 3M.

anticipar maniobras y tomar decisiones seguras con suficiente tiempo de reacción.

Por otra parte, la incorporación de materiales retroreflectantes en la señalización también representa una medida de eficiencia y sostenibilidad, ya que elimina la necesidad de iluminación artificial directa en las señales, reduciendo costos de energía y mantenimiento.

Por tanto, la retroreflexión en los materiales de señalización vertical es un componente crucial de la seguridad vial. Gracias a ella, las señales permanecen visibles y legibles durante la noche o en condiciones de baja iluminación, facilitando la conducción segura y evitando accidentes. La elección adecuada de materiales retroreflectantes y su correcto mantenimiento son, por tanto, aspectos indispensables para garantizar una infraestructura vial eficiente y segura para todos los usuarios.

2. Materiales

La señalización vertical utiliza hoy principalmente dos familias de materiales retroreflectantes: láminas prismáticas (microprismas de alto rendimiento) y láminas con microesferas de vidrio. Cada tecnología tiene características ópticas, durabilidad y aplicaciones distintas.

2.1. Láminas microprismáticas

Son películas formadas por microprismas que redirigen la luz de forma muy eficiente hacia su origen. Ofrecen altos niveles de retroreflexión a distancias medias-largas y mejor rendimiento angular (visibilidad desde ángulos oblicuos). Dentro de esta familia hay gamas industriales que se usan en señales permanentes en carreteras de alto tráfico y donde se requiere larga vida útil y buena visibilidad nocturna. Sus principales ventajas es que proporcionan una alta retroreflexión, presentan una buena estabilidad cromática y ofrecen una larga vida útil. Como contrapartida ofrecen un coste de adquisición superior al de los materiales microesféricos. Actualmente es la tecnología predominante en la señalización vertical instalada en zonas interurbanas o vías de alta intensidad de tráfico.

2.2. Láminas con microesferas de vidrio

Esta tecnología se está utilizando cada vez con menos frecuencia. Consisten en láminas con una capa de microesferas (parcialmente embebidas) que reflejan la luz proveniente de la fuente luminosa en la dirección del observador. Funcionan bien en condiciones normales y suelen ser más económicas que los microprismas, pero los niveles de retroreflexión proporcionados por

estos materiales suelen ser sensiblemente inferiores. Todavía se emplean en determinadas aplicaciones en señalización urbana y en algunas carreteras de baja intensidad de tráfico. Su mantenimiento puede ser más exigente en entornos agresivos (suciedad, abrasión) y su vida útil es más reducida que en el caso de los materiales microprismáticos.

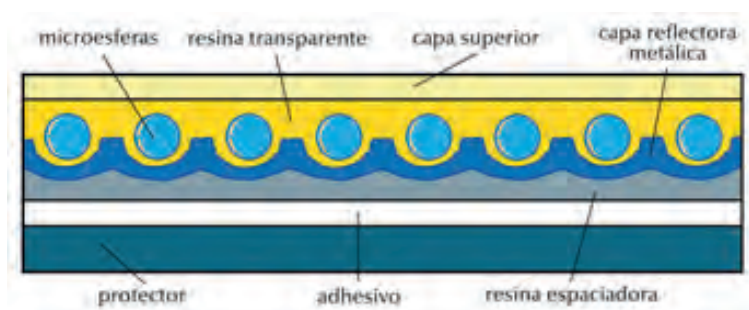


Figura 2. Sección transversal de una lámina con microesferas de vidrio. Fuente: 3M.

2.3. Normativas principales

En primer lugar, la norma armonizada europea UNE-EN 12899-1 [1] establece, principalmente, los requisitos técnicos en referencia a las láminas retrorreflectantes microesféricas para garantizar la visibilidad y legibilidad de las señales verticales fijas. Esta norma, también incluye las prescripciones para el marcado CE, que acredita el cumplimiento de las especificaciones técnicas esenciales de estos productos.

Por otro lado, la norma UNE 135340 [2] define los requisitos técnicos y métodos de ensayo para láminas retrorreflectantes microprismáticas poliméricas utilizadas en señales verticales. Dentro de las clases, según el nivel de retrorreflexión proporcionado, que define esta norma, se crean tres subgrupos en la clase 3 (la clase que define los materiales que proporcionan valores más elevados de retrorreflexión) en función de su comportamiento y su adaptación a condiciones geométricas y de trazado diferentes. Estas subclases (RA3ZA, RA3ZB y RA3ZC) permiten a los fabricantes y administraciones seleccionar el tipo de lámina más adecuado según el entorno y los requisitos de seguridad vial.

La Norma 8.1-IC [3] de la Instrucción de Carreteras establece los siguientes principios generales en relación con la retrorreflexión:

- La retrorreflexión es un requisito esencial para garantizar la visibi-

lidad nocturna y en condiciones adversas.

- Todas las señales verticales deben incorporar material retrorreflectante conforme a los niveles definidos en el PG-3, artículo 701 [4], y las normas UNE correspondientes.

También determina qué clase de retrorreflexión debe emplearse según el tipo de vía.

Por último, el artículo 701 del PG-3 establece de forma principal, las especificaciones técnicas mínimas de los materiales empleados en cuanto a retrorreflexión (y otros parámetros como coordenadas cromáticas, factor de luminancia, durabilidad, ...). Este documento indica que, los materiales microesféricos (RA1 y RA2) deben cumplir con la UNE-EN 12899-1. Por otro lado, los materiales microprismáticos (RA1, RA2 y RA3) deben cumplir con la UNE-EN 12899-1 y la UNE 135340.

3. Métodos de evaluación de la retrorreflexión

Según se ha indicado anteriormente, dado que el objeto de la señalización vertical es mantener la seguridad, eficiencia y comodidad de la circulación, las señales deben ser visibles y legibles en todo momento, especialmente durante la noche. La visibilidad de una señal dependerá de su localización, del

estado de conservación o limpieza, del tipo de material y del tamaño, así como de la agudeza visual del conductor y de si el entorno está o no iluminado. La visibilidad debe garantizarse a largo plazo, ya sea en condiciones de iluminación difusa o con la luz de los propios faros del vehículo en condiciones nocturnas, manteniendo siempre unos valores mínimos de retrorreflexión.

El documento reglamentario 'Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)' [5] de la Federal Highway Administration (FHWA) describe una variedad de sistemas y métodos utilizados para evaluar el estado de la señalización y mantener los niveles de retrorreflexión de las señales, que son:

3.1. Inspección subjetiva mediante valoración visual nocturna con un inspector capacitado

En este caso, el inspector utiliza señales o láminas patrón como referencia para compararlas con las señales instaladas. Aunque este método permite evaluar la señalización en condiciones reales y en entorno nocturno, se trata de un procedimiento altamente subjetivo, de dudosa repetibilidad y reproducibilidad, incluso cuando se intenta mantener las mismas condiciones de ensayo e iluminación de los faros.

3.2. Medición con retrorreflextómetro sobre la propia señal

La medición consiste en determinar el valor de la retrorreflexión con los ángulos de incidencia y de observación establecidos en la normativa correspondiente.

Este método es totalmente objetivo y es el que se utiliza también en laboratorio para la aceptación de los materiales retrorreflectantes. Sin embargo, se trata de un procedimiento laborioso y potencialmente peligroso para la seguridad vial de los técnicos, que requiere dedicar recursos y emplear elementos auxiliares, especialmente cuando se desea realizar la medición en pórticos o banderolas.

Además, este método no tiene en cuenta otros atributos relacionados con la visibilidad o la legibilidad de las señales, ya que se basa en una medida puntual en un área muy reducida.

Por lo general, existen normativas nacionales que establecen el número de puntos a ensayar en cada señal, así como las anotaciones que deben realizarse sobre su estado general (arañazos, golpes, corrosión, etc.). [6]

3.3. Auscultación mediante el uso de equipos de alto rendimiento

Dado los inconvenientes que presenta la medición de la retrorreflexión con equipos estáticos, se han desarrollado sistemas que permiten la auscultación de la señalización a velocidad de tráfico, obteniendo la retrorreflexión de cada uno de los colores que componen las señales. Disponer de equipos de medida a velocidad de tráfico elimina la presencia en la calzada de vehículos y personal estacionados, evita el uso de elementos auxiliares e incrementa el rendimiento de las auscultaciones, lo que permite aumentar la frecuen-



Figura 3. Medida del coeficiente de retrorreflexión mediante equipo estático durante los trabajos de intercomparación

cia de los controles o la longitud de los tramos sometidos a estudio.

Los sistemas dinámicos utilizan equipos que eliminan la influencia de otras fuentes de iluminación externas (los propios faros del vehículo portador del sistema, los faros del resto de vehículos presentes en la vía, así como la iluminación de la vía en el caso de estar presente). Además, controlan en cada momento la cantidad de luz emitida y su distribución, al objeto de eliminar la influencia de fuentes de luz externa en la medida del coeficiente de retrorreflexión.

Los sistemas de visión que portan están diseñados para medir la luminancia en condiciones nocturnas de baja iluminación y en el caso de utilizar sistemas de adquisición de imágenes para la medida de luminancia es posible distinguir la zona de la imagen donde se cumple la geometría especificada, así como distinguir las zonas de la superficie de la señal correspondientes a cada color. Dichos sistemas de medida de luminancia operan en el rango visible del espectro dentro de la sensibilidad del ojo humano.

Además de los equipos de visión instalados disponen de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) que permiten realizar el control de la posición geométrica de la señal con

respecto a la carretera. Asimismo, se controla en cada momento la inclinación del equipo de medida, para garantizar que las medidas se realizan con la geometría de medida correcta. Adicionalmente y en conjunción con los sistemas de posicionamiento indicados, los vehículos están equipados con odómetros para obtener un posicionamiento relativo durante el recorrido.

El aumento de la frecuencia de las inspecciones con los sistemas dinámicos mejora el conocimiento del estado de la señalización de la red de carreteras, posibilitando planificar las actuaciones sobre la base de decisiones apoyadas en datos suficientes y objetivos, y contribuyendo de manera sostenida a la mejora de la seguridad vial.

El uso de equipos de alto rendimiento sustituye o complementa a otros métodos que consideran la vida útil estimada de un determinado tipo de lámina en una región o zona, realizando la sustitución en función de la estimación efectuada para cada tipología de señal. También complementa a otros enfoques que plantean la reposición de las señales basándose en que, en un momento determinado y en un área concreta, deben sustituirse todas, con independencia del estado de servicio individual. Los in-

tervalos de sustitución pueden establecerse en función del conocimiento de la vida útil estimada.

4. Factores de influencia en la medida del coeficiente de retrorreflexión

Tanto con equipos dinámicos como con equipos estáticos existen una serie de factores que influyen en la medida de la retrorreflexión de las señales en servicio y que deben tenerse en cuenta. Los más importantes son los siguientes:

- Tipo y clase del material retroreflectante: el tipo de lámina (microesferas de vidrio, microprismática, etc.) y la clase de retrorreflexión de la lámina.
- Condiciones geométricas de medida: Ángulos de observación y de incidencia definidos por la normativa y su posible ángulo de rotación, ϵ . En general, al aumentar estos ángulos, disminuye el coeficiente de retrorreflexión.
 - El ángulo de observación, α , es el formado entre la dirección de la luz incidente en la lámina retroreflectante procedente de la fuente de iluminación y la de la luz devuelta por dicha lámina hacia el observador [7].

- El ángulo de incidencia, β , es el comprendido entre el haz de luz incidente en la lámina retroreflectante y la normal a la superficie de la misma.
- El ángulo de rotación, ϵ , medido en el plano de la lámina, desde el semiplano de observación hasta el eje de referencia. Es clave para aquellos materiales retroreflectantes, en los que su comportamiento fotométrico se ve influenciado por la orientación del propio material, como, por ejemplo, la tecnología microprismática.

- Condiciones de la superficie: la presencia de suciedad, polvo, humedad, arañazos, abrasión o deterioro del recubrimiento superficial puede afectar significativamente al valor de retrorreflexión medido.
- Condiciones ambientales y meteorológicas: la humedad ambiental, el rocío, la lluvia o la condensación influyen en los resultados obtenidos, por lo que debe evitarse la realización de ensayos en tales condiciones.

En el caso de la auscultación con equipos a velocidad de tráfico, la medida de la retrorreflexión también se ve afectada por la orientación y colocación de la señal respecto al eje del carril de circulación. No obstante,

debe tenerse en cuenta que estas corresponden a las condiciones reales de observación para el usuario de la carretera. Asimismo, es imprescindible, que los sistemas de alto rendimiento sean capaces de anular la influencia de todas las fuentes de luz externa, como se ha indicado anteriormente.

5. Ensayo comparativo

Dada la creciente necesidad de optimizar la gestión del estado de la señalización vertical en la Red de Carreteras del Estado, la Dirección Técnica de la DGC impulsó un estudio para analizar el comportamiento de los métodos de auscultación de alto rendimiento y su correlación frente al método tradicional de medida del coeficiente de retrorreflexión que emplea equipos estáticos.

Con este propósito, en el año 2024, se organizó una serie de ensayos de intercomparación entre equipos estáticos y dinámicos coordinados por personal de la Dirección Técnica en la que participaron dos compañías que actualmente prestan servicios de auscultación en continuo (AMAC EUROPA y EUROCONSULT Nuevas Tecnologías). Asimismo, se contó con la colaboración de técnicos del CEDEX para las tareas de campo y gabinete.

5.1. Equipos participantes y tramos de ensayo

En el estudio intervinieron tres equipos de medición estáticos correspondientes a dos fabricantes distintos de retrorreflectómetros portátiles manuales. Estas tres unidades, pertenecientes a ambas empresas y el CEDEX, fueron operadas de forma independiente por sus titulares.

Los dispositivos se configuraron con la geometría de ángulos contemplada en la Norma europea

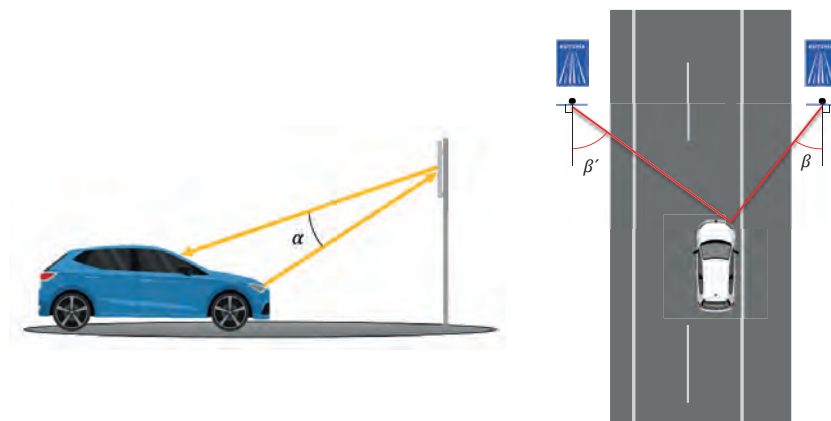


Figura 4. Ángulos de observación (α) e incidencia (β). Fuente: Elaboración propia.

EN 12899-1 (ángulo de observación $\alpha = 0,33^\circ$ y ángulo de incidencia $\beta = 5,0^\circ$). En todas las medidas se tomaron precauciones para colocar los retrorreflectómetros en posición vertical con el objetivo de minimizar la influencia del ángulo ϵ .

Con relación a los equipos dinámicos, se emplearon los sistemas denominados AMAC Y VISUALISE desarrollados por las compañías AMAC EUROPA y EUROCONSULT Nuevas Tecnologías, respectivamente.

Para realizar el estudio, los tramos de ensayo fueron previamente seleccionados, con el fin de obtener una gran variabilidad, tanto en cuanto a los tipos de señales (carteles, paneles, señales) así como en cuanto a las fechas de instalación y sus condiciones de visibilidad nocturna.

En una primera fase de estudio se seleccionó la autovía A-40 entre los pp.kk 90+000 y 130+000 y la carretera convencional N-401 entre los pp.kk 80+000 y 132+000 por contar con distintas tipologías de señales y colores.

La A-40 es un tramo con valores medios del coeficiente de retrorreflexión propios de señales de reciente instalación (blanco por encima de 500 cd/lx m², rojo superior a 100 cd/lx m² y azul por encima de 50 cd/lx m²) que conecta las localidades de Maqueda y Olías de Rey en la provincia de Toledo en dirección Sureste-Noroeste. El tramo de la N-401 discurre en dirección Norte-Sur entre los municipios de Burguillo de Toledo y Urda en la provincia de Toledo con valores de retrorreflexión altos (blanco por encima de 500 cd/lx m², rojo superior a 85 cd/lx m² y azul por encima de 50 cd/lx m²).

En la segunda fase, se escogió un tramo de la carretera convencional N-620 con un periodo de señaliza-



Figura 5. Izqda. Equipos Delta GRX-3 y GRX-7 utilizados por las empresas EUROCONSULT N.T. y AMAC EUROPA, respectivamente. Dcha. Equipo Zehntner ZRS 6060 empleado por el CEDEX.



Figura 6. Equipos dinámicos AMAC y VISUALISE para la medida del coeficiente de retrorreflexión de la señalización vertical.

ción en servicio mayor a las otras dos carreteras en base a los datos de inventario facilitados por el sistema de información geográfico de la DGC. El tramo seleccionado fue el comprendido entre los pp.kk. 157+000 y 182+000 situado en la provincia de Valladolid, entre las localidades de Tordesillas y Alaejos. Los valores medios del coeficiente de retrorreflexión son: blanco por debajo de 325 cd/lx m², rojo inferior a 100 cd/lx m² y azul por debajo de 50 cd/lx m².

5.2. Metodología de ensayo

En la fase inicial, se realizaron las mediciones de los dos equipos dinámicos. Los vehículos de ensayo circularon en sentido creciente, y por los carriles exteriores en el caso de la A-40, registrando todas las señales presentes en el tronco de calzada, tanto en el margen izquierdo como en el derecho y los pórticos y

banderolas sobre la calzada. No se consideraron las señales presentes en las entradas y salidas de la carretera, aunque gran parte de ellas, por su posición y geometría, pudieran haberse medido con los equipos dinámicos.

Las medidas de los equipos dinámicos se efectuaron a velocidad del tráfico, en la misma noche y un equipo a continuación del otro para minimizar cualquier diferencia en las condiciones de medida obteniéndose los valores medios sobre cada color de la señal o un área seleccionada de la misma.

Una vez recepcionados los resultados procedentes de los sistemas dinámicos y en las semanas siguientes a dichas medidas, se llevaron a cabo las auscultaciones con los equipos estáticos. La toma de datos, supervisada por personal de la

Tabla 1. Señales evaluadas mediante equipos estáticos.							
	Nº señales	BLANCO ESTÁTICO R _A (cd/lx m²)		AZUL ESTÁTICO R _A (cd/lx m²)		ROJO ESTÁTICO R _A (cd/lx m²)	
		Promedio	Percentil 85	Promedio	Percentil 85	Promedio	Percentil 85
A-40	24	660	771	51	58	107	112
N-401	22	598	737	53	54	90	116
N-620	32	311	598	40	67	86	115

Dirección Técnica, se programó en los mismos días para los tres retroreflectómetros. Tanto los ensayos dinámicos como los estáticos se realizaron en condiciones climatológicas adecuadas.

En los tramos se seleccionó un lote de señales de distintas características que a su vez estuvieran menos expuestas al tráfico, descartándose aquellas señales instaladas en pórticos o banderolas que dificultan en gran medida la toma de datos incluso con la ayuda de pértigas. Estas señales del lote fueron evaluadas por los tres equipos estáticos en el mismo instante con el propósito de minimizar variaciones externas al método de medida.

En cada señal, se practicaron nueve lecturas puntuales en cada color con los retrorreflectómetros, tres por cada equipo, con las que se calculó la media por color. En la tabla 1 se distingue un menor nivel de coeficiente de retrorreflexión en la señalización de la N-620 en comparación al resto de tramos, particularmente para el color blanco.

5.3. Análisis de resultados

Previo al estudio de los resultados de la intercomparación se debe aclarar que las mediciones realizadas con los equipos estáticos pueden experimentar una variabilidad relevante, en parte debida a las propias características del dispositivo o bien, a posibles deterioros, acumulación de suciedad u otras causas que ori-

ginen una falta de homogeneidad de la superficie de la lámina que interfiere en la naturaleza puntual de la medida. Esta distorsión justifica que los valores de referencia de cada señal se obtengan a partir de la media de las nueve lecturas de los equipos estáticos.

Aunque el análisis de la repetibilidad de los retrorreflectómetros no formaba parte del objetivo principal de estudio, se estimó la dispersión de las medidas estáticas de cada color mediante la desviación típica de las nueve lecturas dividida por su valor medio y expresado en valor porcentual. Se observó que, en el caso del color blanco, el coeficiente de variación así calculado era inferior al 14%, situándose la mayor parte de valores por debajo del 8%, siendo esta dispersión más que aceptable para la incertidumbre esperable en estos equipos.

Abordando la comparativa entre mediciones estáticas y dinámicas simultáneamente para las tres carreteras, se calcularon las rectas de regresión para los colores blanco, azul y rojo que correlacionan cada medida dinámica con su correspondiente valor medio estático considerado como patrón, tratándose independientemente los resultados de cada equipo de alto rendimiento. Estas rectas se forzaron a pasar por el origen. En un escenario ideal la representación gráfica debería mostrar una recta de pendiente 1:1.

En esta primera evaluación en la que se consideró la totalidad de las medidas separadas por colores, se observó una relación significativa entre los resultados de ambas tecnologías, con unas rectas de ajuste cuyas pendientes no difieren en más de un 20% de la ideal y que por otra parte arrojan unos coeficientes de determinación R² comprendidos entre 0,57

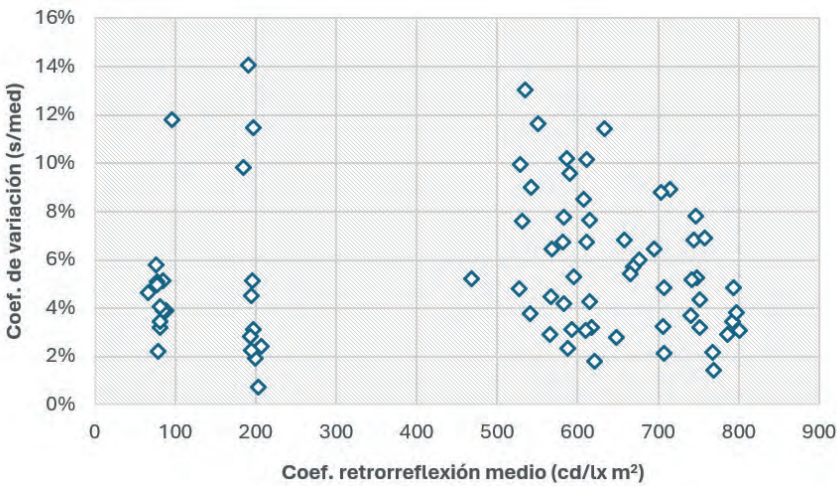


Figura 7. Dispersión para medidas estáticas, en color blanco, de los tres tramos.

y 0,95, siendo la correlación menos aproximada para el color azul y mayor en el blanco. El análisis revela que la bondad del ajuste disminuye para aquellos valores de retrorreflexión muy elevados (especialmente por encima de 500 cd/lxm² en el blanco) correspondientes a señales que cumplen sobradamente con las especificaciones de coeficiente de retrorreflexión exigidas a la señalización recién instalada. Dado que el valor de retrorreflexión de una señal nueva es muy superior al umbral mínimo exigido y la variabilidad de la medida, en ese rango de valores, no es relevante, parece conveniente focalizar el estudio en aquellas lecturas por debajo de los mínimos recogidos en las normativas que podrían ser indicativas de la necesidad de reposición de las señales que no garantizan la visibilidad nocturna a causa de su envejecimiento y/o deterioro.

Conviene recordar que los valores mínimos de coeficiente de retrorreflexión exigidos a la señalización durante su periodo de garantía dependen de su clase de retrorreflexión. Actualmente, existen tres clases de retrorreflexión independiente de la naturaleza microesférica o microprismática de los materiales; Clases RA1, RA2 y RA3. La Norma 8.1.1.C fija los criterios de selección para la clase de retrorreflexión mínima (tabla 2). A su vez, la Clase RA3 se divide en las tres clases, mencionadas al comienzo del artículo; RA3-ZA, RA3-ZB y RA3-ZC, específicas para los entornos de ubicación indicados en el apartado 701.3.6 del PG-3.

Tabla 2: Clase de retrorreflexión mínima en señales y carteles (tabla 1 de la Norma 8.1-I.C. Señalización vertical de la Instrucción de Carreteras).

TIPO DE SEÑAL O CARTEL	ENTORNO DE UBICACIÓN DE LA SEÑAL O CARTEL		
	ZONA PERIURBANA (Travesías, circunvalaciones...)	AUTOPISTA, AUTOVÍA Y ANTOGUAS VÍAS RÁPIDAS	CARRETERA CONVENCIONAL
SEÑALES DE CONTENIDO FIJO	Clase RA2	Clase RA2	Clase RA2
CARTELES	Clase RA3	Clase RA3	Clase RA2

No obstante, dichos criterios son de mínimos y aplican exclusivamente a los métodos de ensayo puntual (apartado 701.8.2 del PG-3), asimismo, cabe la posibilidad de que los pliegos de prescripciones técnicas particulares fijen unos estándares más elevados o que los gestores prefieran reforzar la visibilidad de la señalización en puntos donde la seguridad vial esté comprometida. Ante la ausencia de certidumbre plena en la determinación de la clase de retrorreflexión de las señales y carteles analizados, se optó por limitar el análisis al conjunto de señales cuyos registros correspondientes a la media de los valores estáticos fuera inferior a los valores mínimos establecidos para la clase de retrorreflexión RA3-ZA, que ofrece mayores prestaciones. De este modo, se asegura, con una certeza razonable, que cualquier señal o cartel examinado incumple al menos una de las especificaciones de las clases de rendimiento existentes, centrando de este modo, el análisis en el rango de valores más interesante desde el punto de vista de la conservación de la señalización.

Según el PG-3, el grado de cumplimiento de las prestaciones de los materiales retrorreflectantes de clase RA3 se evalúa conforme a lo dispuesto en la Norma UNE 135340 que, en su tabla A.3, establece los valores mínimos de coeficientes de retrorreflexión de la clase RA3-ZA en 425 cd/lx m² para el color blanco, 85 en el rojo y 28 en el azul, siendo estos umbrales los definidos para una angularidad $\alpha\alpha = 0,33^\circ$ y $\beta\beta = 5,0^\circ$.

Aclarado este punto, se analizaron exclusivamente las señales con promedios estáticos que no satisfacían los requisitos anteriores del color blanco, el rojo, o ambos si coexisten en la misma señal. El color azul no se consideró al no ser representativa la muestra obtenida dado que apenas se obtuvieron valores inferiores a 28 cd/lx m². Las rectas de regresión obtenidas en base a estos criterios se muestran en la figura 8.

En los gráficos se observa una elevada concentración de valores entorno a las rectas de regresión calculadas, las cuales muestran pendientes entre 0,98 y 1,08, con valores de R² superiores a 0,93. El ajuste en

Tabla 3: Valores mínimos del coeficiente de retrorreflexión de clase RA3-ZA, en cd/lx m² (extracto de la tabla A.3 de la Norma UNE 135340).

Angularidad		Colores no fluorescentes							
Ángulo de observación α	Ángulo de incidencia β	Blanco	Amarillo	Rojo	Verde	Azul	Marrón	Naranja	Gris
0,33°	+5°	425	275	85	40	28	13	210	210

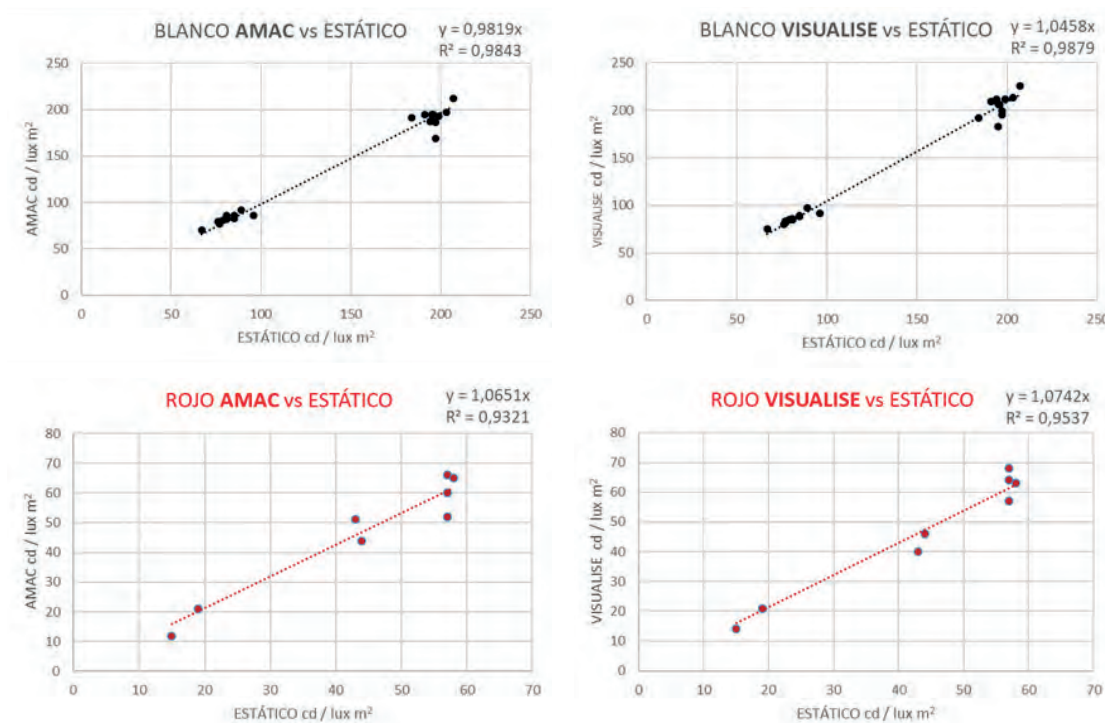


Figura 8. Correlaciones entre medidas estáticas y dinámicas del coeficiente de retrorreflexión, inferiores a los umbrales de Clase RA3-ZA, obtenidas en los tres tramos.

estas condiciones es superior, especialmente en el color rojo que inicialmente presentaba una pendiente de 1,18 junto con un valor de R^2 igual a 0,67 en una de las correlaciones.

De acuerdo con la información recopilada, se procedió a aplicar la misma metodología de forma exclu-

siva al tramo de la N-620 para respaldar los resultados (ver figura 9 y tabla 4).

En los gráficos de la figura 9 se confirma una fuerte correlación lineal dado que los valores de las mediciones completas de la N-620 son, en general, inferiores a los de los otros

dos tramos estudiados y, por consiguiente, más próximos al rango de coeficientes de retrorreflexión para el que se optimiza la precisión de la medición de los equipos dinámicos.

En la tabla 4 se han recogido los valores de las pendientes de las líneas de tendencia de la N-620 y

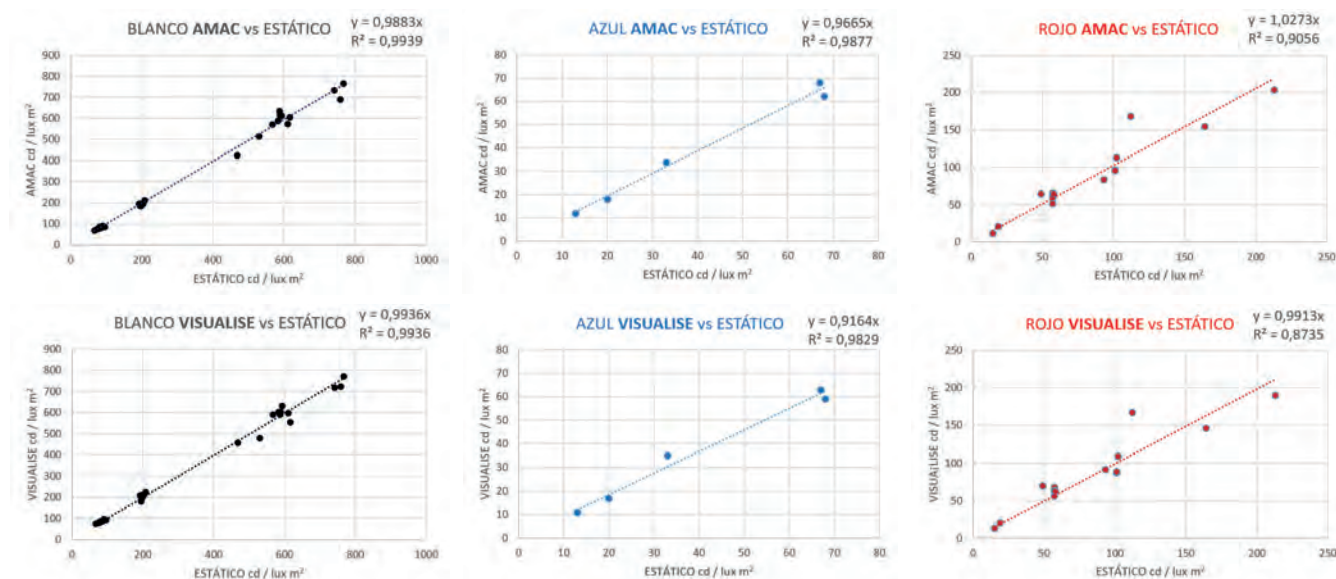


Figura 9. Correlación entre el total de medidas estáticas y dinámicas del coeficiente de retrorreflexión en la N 620

Tabla 4: Comparativa entre correlaciones, en la N-620, antes y después de considerar únicamente los valores inferiores a umbrales de la Clase RA-ZA.

	Pendiente con medidas totales	Pendiente con medidas bajo umbral	R ² con medidas totales	R ² con medidas bajo umbral
Blanco AMAC	0,9883	0,9875	0,9939	0,9931
Blanco VISUALISE	0,9936	1,0510	0,9936	0,9878
Rojo AMAC	1,0273	1,0583	0,9056	0,9467
Rojo VISUALISE	0,9913	1,0978	0,8735	0,9737

Tabla 5: Comparativa de errores relativos medios antes y después de considerar valores inferiores a umbrales de la Clase RA-ZA.

	BLANCO DINÁMICOS		AZUL DINÁMICOS		ROJO DINÁMICOS	
	Medición completa	Valores <RA3-ZA	Medición completa	Valores <RA3-ZA	Medición completa	Valores <RA3-ZA
E. rel. medio A-40	15%	-	16%	-	18%	-
E. rel. medio N-401	19%	5%	16%	-	11%	4%
E. rel. medio N-620	4%	4%	8%	-	14%	11%
E. rel. medio total	12%	4%	14%	-	14%	9%

los correspondientes cuadrados del coeficiente de Pearson, antes y después de considerar valores inferiores a umbrales de la Clase RA-ZA. Al igual que en el caso previo, se han omitido las correlaciones del color azul debido a que la cantidad de datos disponibles no permite una representación significativa de ese color.

Como se puede comprobar, en la tabla 4, se refleja un distanciamiento de la pendiente de la recta de regresión respecto a la pendiente ideal (1:1) después aplicar la restricción de medidas más bajas, siendo esta desviación superior en el color rojo. No obstante, esto podría deberse a que las correlaciones de partida ya están fuertemente ajustadas (con pendientes entre 0,98 y 1,02) y posiblemente sean más sensibles a pequeños cambios de una muestra poblacional de por sí reducida. Dicho fenómeno no es preocupante puesto que, para el color rojo se obtiene una mejoría del coeficiente R², que se traduce en que los puntos se distribuyen más cerca de la recta de re-

gresión. Por otra parte, el coeficiente de determinación del blanco apenas ha experimentado variación, siendo muy alto en origen (0,99) con muy escaso margen para la mejora.

Otra forma de enfocar el estudio es mediante el análisis de sesgos determinado por el error relativo entre las mediciones estáticas y el promedio de los dos equipos dinámicos. En la tabla 5 se indica la evolución de dicho parámetro después de considerar los valores inferiores al umbral utilizado en las correlaciones, demostrando que el criterio escogido es acertado puesto que los errores disminuyen en el rango de valores críticos para la reposición de las señales.

Es importante señalar que los resultados procedentes de los equipos dinámicos deberían ser inferiores a los obtenidos con el sistema estático, ya que desde el punto de vista teórico existe complejidad para garantizar la angularidad deseada durante la auscultación dinámica que se ve

afectada por la posición e inclinación relativa de la señal respecto al vehículo portante del equipo, en contraposición a la estabilidad de la configuración de ángulos que ofrecen los retrorreflectómetros portátiles. Sin embargo, la mayoría de las lecturas dinámicas del ensayo correspondientes al color rojo se sitúan por encima de las referencias estáticas. Una posible causa de este comportamiento se deba a que, el color rojo está exclusivamente presente en la orla de la práctica totalidad de señales estudiadas, teniendo en cuenta que el borde de las láminas supone un área mucho más reducida respecto a la que ocupan los fondos blancos y azules habituales, que dificulta la selección de la superficie analizada por el software de los equipos dinámicos.

6. Conclusiones

El estudio desarrollado ha tratado de analizar el comportamiento de los

equipos de alto rendimiento frente a los equipos estáticos tradicionales empleados para la evaluación del coeficiente de retrorreflexión de la señalización vertical.

Como consideración previa, es necesario tener presente que la naturaleza puntual de las lecturas realizadas con equipos estáticos, que de por sí adolecen de una incertidumbre relevante, plantean una cierta complejidad para compararse con una tecnología que examina un área mayor de la superficie de la señal, que por otra parte, podría ser más representativa de su estado global.

En vista de los resultados, se comprueba que existe una reproducibilidad significativa entre ambos métodos de auscultación para los colores blanco, rojo y azul, que son los más utilizados en las señales existentes en la Red de Carreteras del Estado. La bondad del ajuste se incrementa cuando se focaliza el análisis en señales con valores de retrorreflexión por debajo de los umbrales establecidos para la clase RA3-ZA, que podrían ser indicativos de señales potencialmente degradadas o en el límite de su vida útil funcional. En estas condiciones, las correlaciones presentan pendientes que no difieren en más de un 10% de la ideal y que alcanzan coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,93, lo que confirma la consistencia de las medidas de los equipos dinámicos en el rango de interés operativo. Dicho planteamiento se corrobora al tratar de forma independiente la carretera N-620, donde el efecto de la restricción de valores se amortigua debido a que los niveles iniciales de retrorreflexión son inferiores respecto al resto de tramos evaluados.

El análisis por colores evidencia que el color blanco presenta la mayor robustez en las correlaciones. Por otra parte, el color rojo, si bien arranca de un ajuste más débil, me-

jora significativamente al aplicar el criterio de selección por umbral, reforzando la idoneidad del enfoque adoptado. El color azul, por su parte, no pudo ser analizado con suficiente representatividad debido a la limitada cantidad de datos disponibles por debajo de los límites de retrorreflexión seleccionados.

Cabe señalar que, en general, los resultados de los equipos dinámicos tienden a ser inferiores a los estáticos, debido fundamentalmente, a que las medidas de referencia se realizan con una geometría específica, que resulta difícil de replicar en condiciones de medida dinámica. Sin embargo, los resultados de los equipos de alto rendimiento podrían reflejar, de manera más fiel, las condiciones de visibilidad que experimenta un conductor, en lugar de un método de ensayo estandarizado.

Se concluye que, cuando sea necesario comparar valores del coeficiente de retrorreflexión, próximos o inferiores a los umbrales establecidos en las normas, obtenidos con equipos estáticos y dinámicos, se deben cumplir dos condiciones fundamentales:

- La medición entre los dos sistemas debe haberse realizado en un intervalo de tiempo inferior a un (1) mes.
- Establecer un margen de incertidumbre del 15% entre ambas medidas acorde al percentil 85 del error relativo obtenido.

Al margen de estas premisas, se deben controlar los factores de influencia de la medida mencionados en este artículo, además de garantizar una correcta calibración de los equipos previa a los ensayos.

Se estima conveniente la implantación de un procedimiento estandarizado común que verifique periódicamente la calibración de los

sistemas dinámicos mediante criterios de validación de los resultados que aseguren la repetibilidad y reproducibilidad de la medida.

Como futuras líneas de trabajo, se propone estudiar el comportamiento de las mediciones dinámicas para cada una de las clases de retrorreflexión, diferenciándolas a su vez, por tipologías de material.

Referencias normativas

- [1] UNE-EN 12899-1: 2009. Señales verticales fijas de circulación. Parte 1: señales fijas.
- [2] UNE 135340:2019. Señalización vertical: Láminas retrorreflectantes microprismáticas poliméricas. Características y métodos de ensayo.
- [3] Norma 8.1-I.C. Señalización vertical, de la Instrucción de Carreteras (Orden FOM/534/2014, de 20 de marzo).
- [4] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/2523/2014). Artículo 701. Señales y carteles verticales de circulación retrorreflectantes.
- [5] Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD). 11th edition (2023). Federal Highway Administration.
- [6] UNE 135352: 2024. Señalización vertical y balizamiento. Control de calidad "in situ" de elementos en servicio. Características y métodos de ensayo.
- [7] UNE 135341:2017 IN. Señalización vertical. Guía de selección de materiales retrorreflectantes.

