

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL

Informe Final

Control de densidad de carpeta asfáltica mediante el uso del densímetro electromagnético.

Mónica Eloísa Rueda Peña
Directora General UAERMV

Camilo Enrique Marrugo Martínez
Gerente del Desarrollo, la Calidad y la Innovación

Humberto Ramírez Gómez
Director o Líder del Proyecto

Pedro Antonio Farieta Martínez
Generador o Patrocinador del Proyecto

BOGOTÁ D.C., 2025

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
1. JUSTIFICACIÓN.....	7
2. ALCANCE	8
3. OBJETIVOS	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos Específicos	8
4. MARCO TEÓRICO	8
4.1. Normatividad vigente	8
4.2. Densidad	9
4.3. Densidad Máxima Teórica (Gmm)	9
4.4. Densidad Bulk (Gmb)	9
4.5. Porcentaje de vacíos (V_v)	9
4.6. Grado de compactación (GC)	10
4.7. Tipos de densímetro	10
4.7.1 Densímetro nuclear	10
4.7.2 Densímetro electromagnético o no nuclear.....	11
4.8. Funcionamiento del densímetro electromagnético	12
5. ANTECEDENTES	13
6. METODOLOGIA	14
6.1. Preparación del lugar del ensayo.....	14
6.2. Realización del ensayo	14
6.3. Registro de datos	14

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

6.4.	Construcción de curvas de compactación	14
6.5.	Toma de núcleos	14
7.	DESARROLLO DEL PROYECTO	15
7.1.	MD12	15
7.2.	MD10	16
7.1.	MCch19	16
8.	CONCLUSIONES	18
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	19

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Principio de operación del densímetro electromagnético.	6
Figura 2. Densímetro nuclear Troxler 3430.....	11
Figura 3. Troxler PaveTracker 2701B de la UAERMV.	12
Figura 4. Comparación de constantes dieléctricas.....	13
Figura 5. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MD12.	15
Figura 6. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MD10.	16
Figura 7. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MCch19.	17

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Densidad mínima de verificación sobre la capa terminada.	9
Tabla 2. Grado de compactación mínimo de la mezcla asfáltica.	10

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

INTRODUCCIÓN

La densidad in situ de una mezcla asfáltica es una propiedad importante acerca de la calidad de los pavimentos flexibles (Leng et al., 2011), porque tanto una densidad muy alta como muy baja puede conllevar a problemas prematuros en el pavimento (Caro et al., 2014; Hu et al., 2016). Así pues, se sabe que una densidad baja incrementa el riesgo de oxidación, daños causados por el agua y agrietamiento, mientras que puede producirse ahuellamiento, desplazamiento y exudación si la mezcla asfáltica se encuentra sobrecompactada (Leng et al., 2018). Normalmente, existen dos formas de estimar la densidad de la mezcla asfáltica, como lo son la toma de núcleos y el uso de un densímetro nuclear (Leng et al., 2018). La toma de núcleos es conocida por ser un ensayo destructivo pero preciso para obtener densidades de mezcla asfáltica, por su parte, el densímetro nuclear es un método utilizado comúnmente en Estados Unidos que es razonablemente preciso, pero conlleva riesgos potenciales de seguridad, dado el uso de materiales con cierta radioactividad (Leng et al., 2018).

Los densímetros electromagnéticos, también conocidos como densímetros no nucleares han ganado importancia últimamente debido a su practicidad. La operación de estos dispositivos se basa en el envío y recepción de ondas electromagnéticas (Fitzgerald, 2002; Leng & Al-Qadi, 2010, 2014; Troxler Electronic Laboratories Inc.s, 2020). Es importante mencionar que el uso del densímetro electromagnético está limitado al control de calidad (Quality Control), mas no al aseguramiento de la calidad (Quality Assurance) (Kvasnak et al., 2007; Mason & Williams, 2009; Romero & Kuhnnow, 2002).

El principio de operación del densímetro electromagnético se muestra en la Figura 1. El funcionamiento de este dispositivo se basa en la medición de una constante dieléctrica de la mezcla asfáltica, que está en función de la densidad Bulk.

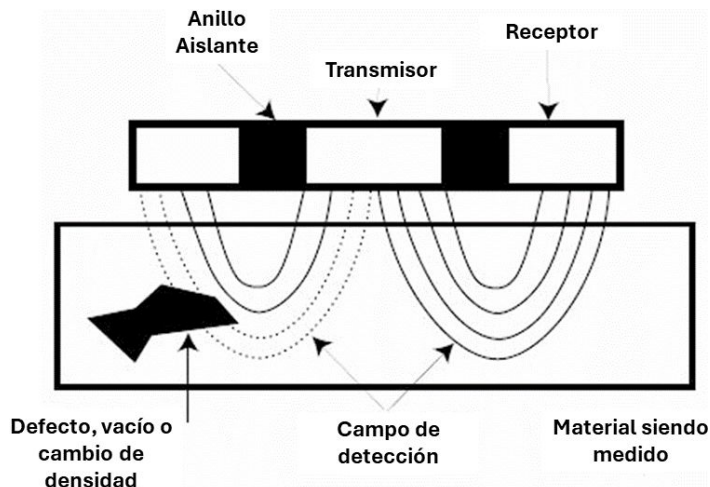


Figura 1. Principio de operación del densímetro electromagnético.
Modificado de Leng et al. (2018).

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

1. JUSTIFICACIÓN

La adecuada conservación de la infraestructura vial es un prerequisite para el **Objetivo 1, Programa 6** del Plan Distrital de Desarrollo de Bogotá 2024-2027 (Alcaldía de Bogotá, 2024), sobre movilidad segura e inclusiva. En Bogotá, existen tramos viales con fisuras, baches y discontinuidades que comprometen la seguridad vial y elevan la probabilidad de accidentes, lesiones y pérdidas humanas. En gran medida, estos daños se presentan por deficiencias estructurales consecuencia de una compactación insuficiente o inadecuada durante la instalación de mezclas asfálticas.

En este sentido, uno de los documentos emitidos por la NCHRP (Hughes, 1989) indica textualmente lo siguiente:

“El desempeño estructuralmente adecuado de los pavimentos asfálticos se ve afectado por dos factores principales: un correcto diseño de mezcla y la compactación. Ninguno de estos factores por sí solo puede asegurar una vida satisfactoria del pavimento. Incluso la mezcla mejor diseñada estará sujeta a un desempeño reducido si no se compacta lo suficiente. Sin embargo, una buena compactación puede mejorar eficazmente el desempeño de una mezcla que no sea ideal. Por esta razón, la compactación se considera el factor más importante que afecta al desempeño de los pavimentos asfálticos.”

Por lo tanto, la evidencia técnica respalda la necesidad de controlar rigurosamente la densidad de las mezclas asfálticas en caliente. Un control adecuado prolonga la vida útil del pavimento, reduce los costos de mantenimiento y previene daños prematuros que podrían poner en riesgo la seguridad de los usuarios de los tramos viales. La utilización de un densímetro electromagnético ofrece ventajas operativas frente a otras alternativas, tales como, la entrega de resultados en tiempo real, sin el riesgo radiológico que presenta un densímetro nuclear, simplificando los protocolos de manejo y almacenamiento del equipo y mejorando la seguridad del personal que opera el equipo.

El proyecto se alinea además con el **Objetivo 3, Programa 18** del PDD sobre Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) (Alcaldía de Bogotá, 2024), puesto que se promueve la incorporación de soluciones tecnológicas avanzadas en la gestión de la infraestructura vial. Como se menciona en el PDD, “de acuerdo con la Misión de Sabios, la inversión en I+D debe aumentar al 1,5% del PIB para 2028. Este aumento es imperativo para evitar que Bogotá y Colombia en general se queden rezagadas en productividad, calidad ambiental y progreso social”. Además, “se busca consolidar a Bogotá como una smart city, que promueve la colaboración y el fortalecimiento de su relación con actores locales, regionales, científicos, académicos, empresariales, entre otros” (Alcaldía de Bogotá, 2024).

Finalmente, el proyecto se enmarca con el **Objetivo 5, Programa 36** del PDD sobre Innovación Pública (Alcaldía de Bogotá, 2024), al incorporar metodologías y equipos que optimizan la supervisión de obras y fomentan la transparencia en el uso de recursos públicos. Como lo indica el PDD, la innovación es el motor de la evolución, es ser capaz de identificar y poner en práctica

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

nuevas formas de hacer mejor lo que se ha hecho (en este caso, la verificación de la compactación en tiempo real), y de introducir la producción de bienes y servicios de manera acorde con la evolución de la sociedad, haciendo uso de todos los recursos técnicos y humanos disponibles.

En resumen, es fundamental realizar este estudio porque responde a necesidades críticas de movilidad segura, promueve la adopción de nuevas tecnologías conforme a las metas de I+D y fortalece la innovación pública, articulando de manera coherente los programas 6, 18 y 36 del Plan Distrital de Desarrollo de Bogotá vigente en la presente investigación.

2. ALCANCE

El alcance de este proyecto tiene como objetivo medir in-situ la densidad de mezclas asfálticas competencia de la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV), con el fin de mejorar la durabilidad de dichas estructuras de pavimento.

3. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos que tiene la realización de este proyecto:

3.1. Objetivo General

Generar curvas de compactación que permitan optimizar los tiempos de compactación y garanticen el control de la calidad de los procesos de compactación en las mezclas asfálticas instaladas por la UAERMV.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el tema.
- Realizar toma de datos de densidades en campo con el densímetro electromagnético.
- Realizar las respectivas curvas de compactación.

4. MARCO TEÓRICO

El estudio de las densidades de la mezcla asfáltica en campo se fundamenta en una combinación de conceptos teóricos. A continuación, se presenta un marco teórico que respalda la investigación en este campo.

4.1. Normatividad vigente

El método para la toma de densidades de las mezclas asfálticas está indicado en la ASTM D7113/D7113M-24, en donde se habla sobre los procedimientos para determinar la densidad en campo y la compactación relativa de las mezclas asfálticas por medio de un dispositivo electromagnético para medir los cambios en el campo electromagnético resultantes del proceso de compactación (ASTM, 2024).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vías	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

4.2. Densidad

La densidad es la masa por unidad de volumen que presenta un material, en las mezclas asfálticas generalmente se expresa en kg/m^3 cuando se utiliza el sistema internacional de unidades. La toma de densidades en campo está normalizada por la norma INV-787-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013c), mientras que el valor de la densidad sobre la capa terminada debe ajustarse a los valores de la Tabla 1. Además de lo anterior, se debe tener en cuenta La variación del promedio de los resultados para determinar la densidad D_m se debe evaluar respecto a la densidad específica máxima en el diseño óptimo D_e indicado en el diseño de la mezcla, y el de cada ensayo individual; ~~Respecto al valor~~ promedio D_m .

Tabla 1. Densidad mínima de verificación sobre la capa terminada.

Ensayo		Norma de Ensayo	Cantidad y frecuencia de ensayos por obra realizada		Criterio de aceptación	
			Contratista de Obra	Interventor	Promedio muestras	Determinación individual
Densidad	Mezclas 13 y 19	INV E 733-13	5 cada 800 m ²	2 cada 800 m ²	$\geq 0.94 D_e$	$\geq 0.95 D_m$
	Mezclas 25 y 38	INV E 734-13			$\geq 0.92 D_e$	$\geq 0.95 D_m$

Tomado de Instituto de Desarrollo Urbano (2018).

Donde:

D_m = Densidad promedio.

D_e = Densidad de diseño.

D_i = Densidad individual de cada ensayo.

4.3. Densidad Máxima Teórica (Gmm)

También conocida como densidad máxima específica, es la densidad de la mezcla asfáltica en un estado completamente compacto (i.e., sin vacíos). Se determina a 25°C de acuerdo con la norma INV E-735-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013c).

4.4. Densidad Bulk (Gmb)

Es la densidad aparente de la mezcla asfáltica compactada, que incluye el volumen de los vacíos de aire. Se determina en laboratorio de acuerdo con las normas INV E-733-13 e INV E-734-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013a, 2013b).

4.5. Porcentaje de vacíos (V_v)

Es el volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, expresado como un porcentaje del volumen total. Un contenido de vacíos adecuado es crucial para mejorar la vida útil de la mezcla asfáltica al prevenir problemas como la deformación plástica, la fatiga y la oxidación. El

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

porcentaje de vacíos se obtiene de acuerdo con la norma INV E-736-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013d).

4.6. Grado de compactación (GC)

Es un valor propuesto por el Instituto Nacional de Vías para el control de la compactación de una capa de mezcla asfáltica en caliente de gradación continua (Instituto Nacional de Vías, 2022). El valor del grado de compactación se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$GC = \frac{D_i}{G_{mm} \times \gamma_w} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

GC_i: Valor individual del grado de compactación, en porcentaje.

D_i: Valor individual de la densidad en el terreno.

G_{mm}: Valor de la gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

γ_w: Densidad del agua a 25 °C.

El grado de compactación mínimo que debe tener la mezcla asfáltica según el tipo de capa instalada se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Grado de compactación mínimo de la mezcla asfáltica.

Tipo de capa	Grado de compactación mínimo G _{cmin} , %		
	Nivel de Tránsito		
	NT1	NT2	NT3
Rodadura	94,0	94,0	93,0
Intermedia	92,0	92,0	92,0
Base	-	91,0	91,0
Alto módulo	-	-	93,0

Tomado de Instituto Nacional de Vías (2022).

4.7. Tipos de densímetro

Para la toma de densidades de mezcla asfáltica en campo principalmente se tienen dos tipos de densímetro, como lo son el nuclear y el no nuclear.

4.7.1 Densímetro nuclear

Este es el tipo de densímetro más comúnmente utilizado. Funciona a partir de la emisión de rayos gamma a partir de una fuente de cesio. Los rayos mencionados pasan a través del material hasta llegar a los detectores, por lo cual se ven afectados por la densidad del material. Se ha

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

documentado una baja correlación entre la toma de núcleos y el densímetro nuclear, por lo cual para el aseguramiento de la calidad, muchos estados de los Estados Unidos se guían por la densidad de los núcleos (Mason & Williams, 2009). En la Figura 2 se muestra el densímetro nuclear Troxler 3430.



Figura 2. Densímetro nuclear Troxler 3430.
Tomado de Mason & Williams (2009).

4.7.2 Densímetro electromagnético o no nuclear

Estos dispositivos estiman la densidad a partir de la medición del cambio en el campo electromagnético cuando una corriente eléctrica se transmite a través de la carpeta asfáltica (Mason & Williams, 2009). La Figura 3 muestra el densímetro nuclear que posee la UMV para el proceso de seguimiento y monitoreo a la calidad técnica en obra.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	



Figura 3. Troxler PaveTracker 2701B de la UAERMV.

4.8. Funcionamiento del densímetro electromagnético

Inicialmente, se transmite una corriente eléctrica de un transmisor (Figura 1) a través de la mezcla asfáltica en una ubicación dada y es detectada por un receptor. Es importante tener en cuenta que la corriente no puede fluir a través del anillo aislante. Se mide la impedancia ($\Omega = \text{ohm}$) y se deriva la constante dieléctrica (adimensional) (Praticò & Moro, 2011), es importante mencionar que los cálculos los realiza el equipo de manera correcta siempre y cuando esté calibrado. La constante dieléctrica de la mezcla asfáltica se utiliza para estimar la densidad. La constante dieléctrica depende de la composición de la mezcla asfáltica, ya que se obtiene a partir de las constantes dieléctricas del aire (1) y del asfalto y los agregados (entre 5 y 6). El agua y la humedad, si están presentes, influyen mucho en la estimación de la constante dieléctrica, ya que la constante dieléctrica del agua es de aproximadamente 80 (Praticò & Moro, 2011). En la Figura 4 se muestra la comparación de las constantes dieléctricas de los materiales mencionados anteriormente, con el fin de tener una magnitud de la diferencia entre estos.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

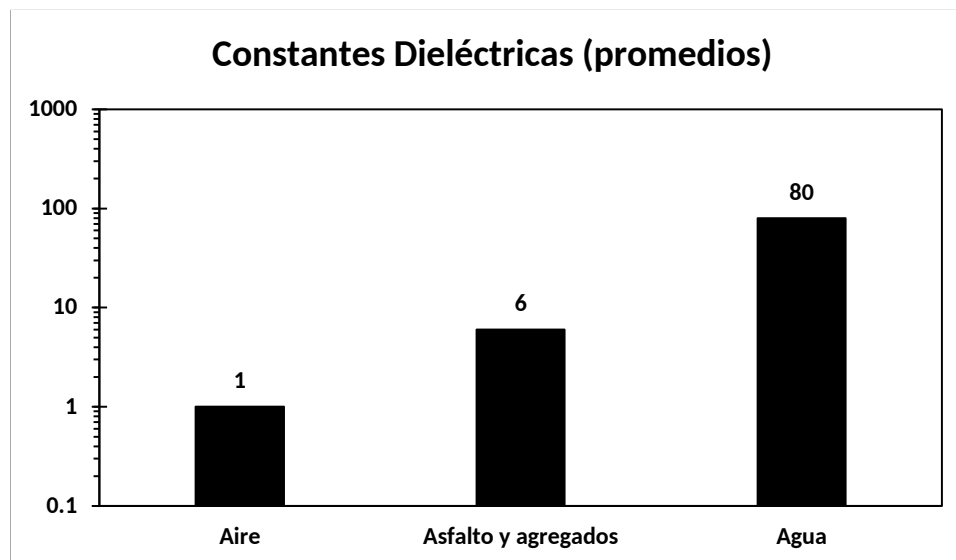


Figura 4. Comparación de constantes dieléctricas.
Tomado de Praticò & Moro (2011).

5. ANTECEDENTES

Para el planteamiento del presente proyecto, se consultaron antecedentes existentes relacionados con investigaciones sobre densímetros no nucleares.

Como se mencionó anteriormente, el equipo más comúnmente utilizado para medir las densidades de la mezcla asfáltica en campo es el densímetro nuclear. Investigadores como Rogge & Jackson (1999) utilizaron el densímetro nuclear para controlar la densidad de una mezcla asfáltica de gradación abierta (Tamaño máximo nominal de 25 mm) y se compararon los resultados con el PQI modelo 301 (modelo de densímetro no nuclear), además de que se tomaron núcleos. Se encontró que ni las densidades del densímetro nuclear ni las del densímetro no nuclear tienen una buena correlación con la densidad de los núcleos, por lo tanto, ningún método puede ser adecuado para el control de la compactación en campo.

Como resultado de ensayos de laboratorio y campo, Henault (2001) y Hausman y Buttlar (2002) concluyeron que aunque el modelo PQI 300 es más fácil de operar y provee lecturas más rápidas que un densímetro nuclear, las lecturas parecen no correlacionarse con la densidad tomada de núcleos de mezcla asfáltica, así como si lo hace el densímetro nuclear. Se demostró que lo anterior se debía a condiciones ambientales como la humedad y la temperatura.

En una investigación realizada por el Departamento de Transporte de Wisconsin, se utilizaron tres tipos de densímetros no nucleares, como lo son el PQI 300, PQI 301 y el Pavetracker 2701B y se compararon con un densímetro nuclear. La investigación concluye que los densímetros deben calibrarse, dado que, este factor aumenta en gran manera el resultado de la densidad del material (Rao & Quintus, 2006).

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Con respecto al uso del equipo, Kvasnak et al. (2007) demostraron que un dispositivo no nuclear para toma de densidades podría ser utilizado para propósitos de aseguramiento de la calidad siempre y cuando el dispositivo se calibre con un tramo de prueba para cada proyecto en específico.

Otra investigación que compara la densidad del densímetro nuclear y no nuclear es la realizada por Smith & Diefenderfer (2008), en donde se menciona que la humedad en la mezcla asfáltica en caliente tiene un impacto significativo en la toma de densidades del densímetro no nuclear. Se encontró que, al realizar una corrección por humedad en la mezcla asfáltica, se encuentra una mejor correlación con la densidad de núcleos al utilizar un densímetro no nuclear, que al utilizar un densímetro nuclear.

Por su parte, Leng et al. (2018) compararon los resultados de densidades de mezclas asfálticas en caliente obtenidas con los densímetros PQI 301 y PaveTracker 2701B. Se encontró que la dirección de la toma de densidad no tiene efecto en el resultado del ensayo, la precisión de los densímetros no nucleares puede ser mejorada por la calibración del dispositivo, la precisión del PaveTracker 2701B puede verse afectada por la presencia de humedad y la gradación de la mezcla afecta la toma de densidad al utilizar el densímetro PQI 301.

6. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo la siguiente metodología.

6.1. Preparación del lugar del ensayo

Se debe remover todo el material suelto y limpiar impurezas existentes en la carpeta asfáltica que va a ser ensayada. Se prepara un área de un tamaño suficiente para acomodar el densímetro electromagnético, de tal manera que el terreno esté plano para que el equipo haga contacto con la carpeta asfáltica.

6.2. Realización del ensayo

Se enciende el equipo y se toma una medida por cada 90 grados, hasta completar cuatro mediciones. El equipo promediará los 4 resultados y el valor se mostrará en la pantalla.

6.3. Registro de datos

Se registra el dato del promedio obtenido en el “Formato de toma de densidades”, teniendo en cuenta el número de pasadas, la hora de toma del dato, el tipo de compactador y el peso del compactador.

6.4. Construcción de curvas de compactación

A partir de los datos obtenidos en campo, se grafica el número de pasadas acumuladas en el eje horizontal y el porcentaje de densidad que registró el equipo en el eje vertical.

6.5. Toma de núcleos

Para realizar la calibración del densímetro electromagnético, se realiza una toma de muestras de la mezcla asfáltica instalada, de acuerdo con la norma INV E-731-13 (INVIAS, 2013). Vale la pena

resaltar que el densímetro debe ser constantemente calibrado con los resultados que arrojen los materiales de la toma de núcleos.

7. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo del proyecto, se tomaron densidades de diferentes tipos de mezclas asfálticas en caliente, se construyeron las curvas de compactación pertinentes y los resultados discriminados por tipo de mezcla son los siguientes.

7.1. MD12

La Figura 5, muestra los datos que se obtuvieron en la toma de densidades con el densímetro electromagnético para la mezcla asfáltica en caliente tipo MD12. De momento, no se encuentra una clara tendencia en los datos tomados, por lo que se debe adquirir más información al respecto. Cada curva está denominada por la fecha en que se tomó.

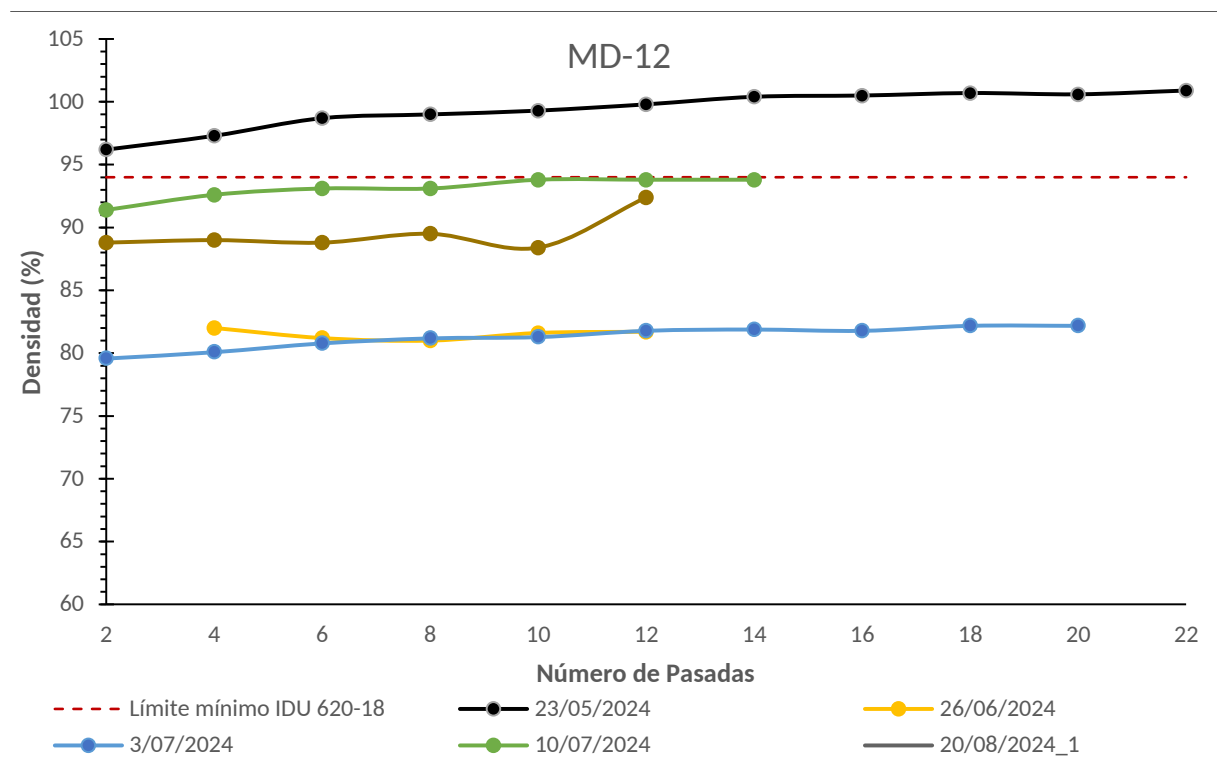


Figura 5. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MD12.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

7.2. MD10

Por su parte, la Figura 6 muestra que a las 10 pasadas se alcanza la densidad de la mezcla solicitada en la especificación IDU 620-18, de acuerdo con los datos que se obtuvieron en la toma de densidades con el densímetro electromagnético para la mezcla asfáltica en caliente tipo MD10. Sin embargo, vale la pena destacar que sólo se cuenta con una única curva para este tipo de mezcla. Cada curva está denominada por la fecha en que se tomó.

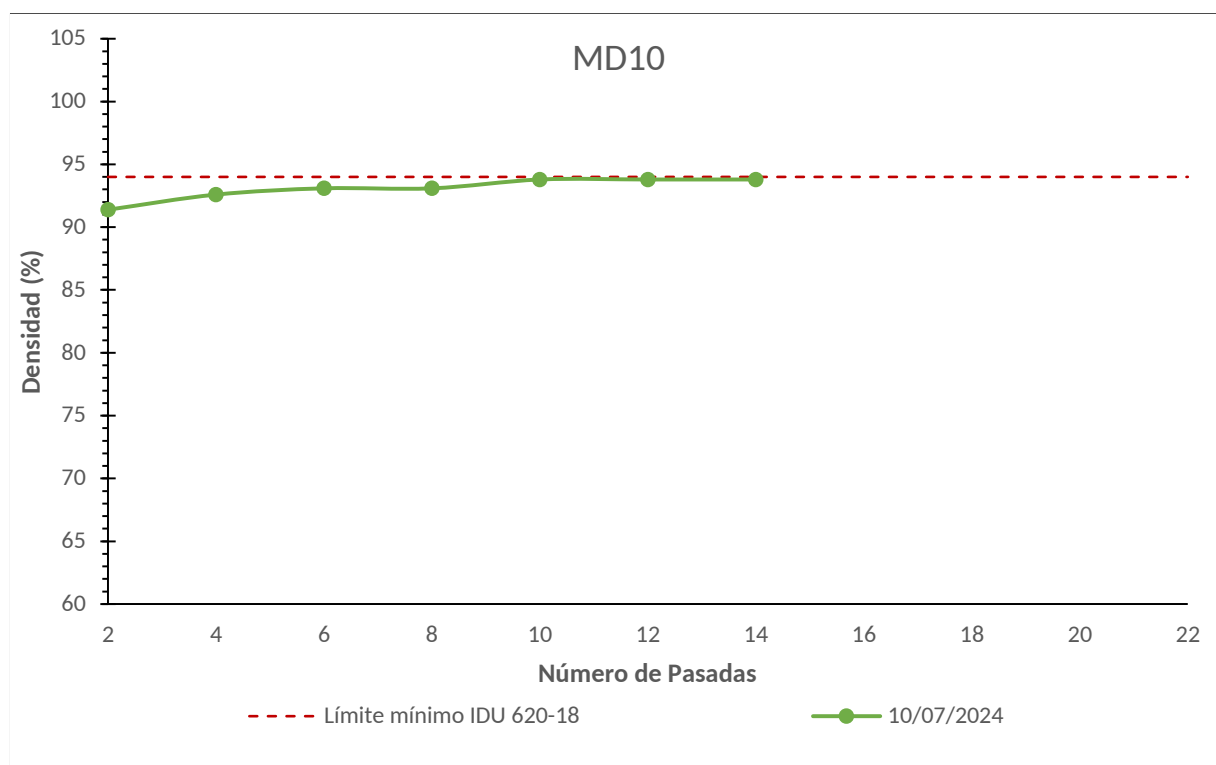


Figura 6. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MD10.

7.1. MCch19

Finalmente, la Figura 7 muestra los datos obtenidos con la mezcla MCch19, es decir, la mezcla asfáltica tipo MD19 modificada con grano de caucho. Sin embargo, vale la pena destacar que sólo se cuenta con dos curvas para este tipo de mezcla y ninguna alcanza el límite mínimo solicitado por la especificación IDU 620-18. Cada curva está denominada por la fecha en que se tomó.

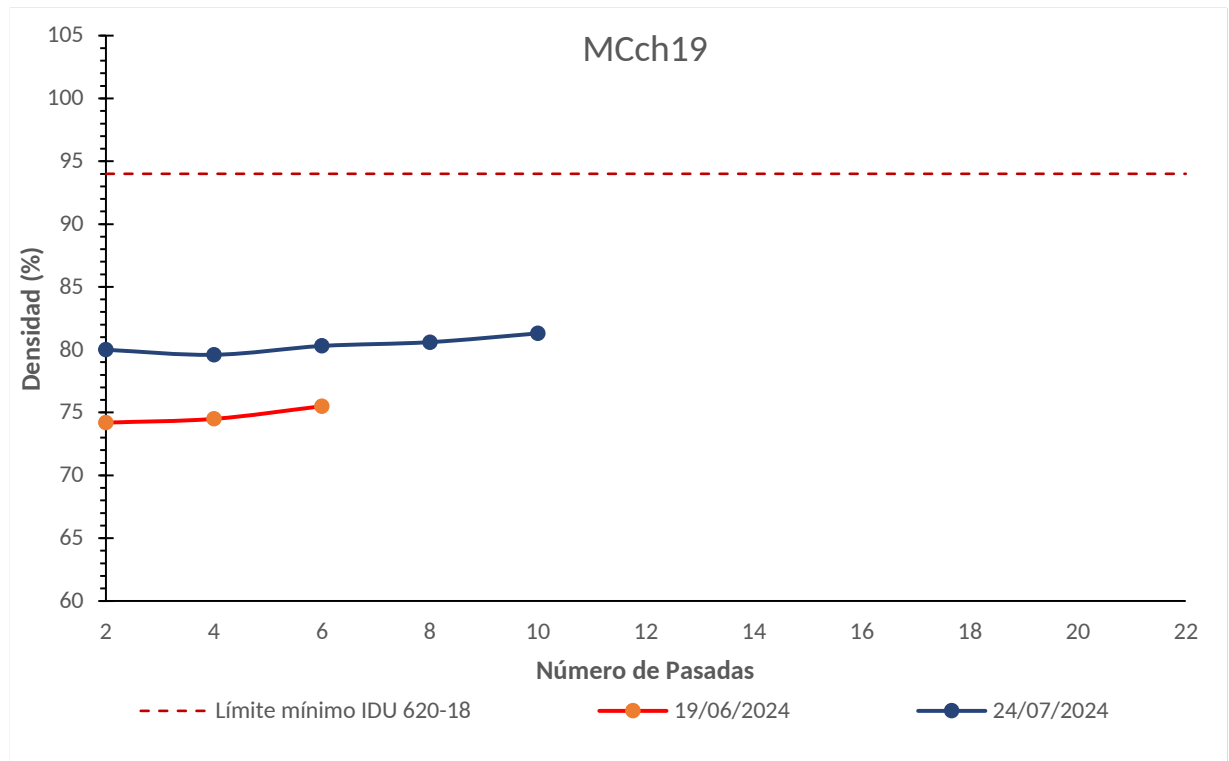


Figura 7. Curva de compactación de mezcla asfáltica en caliente tipo MCch19.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

8. CONCLUSIONES

Este trabajo fue realizado con el fin de generar curvas de compactación que permitan conocer el número de pasadas necesarias para obtener la compactación ideal de cada una de las mezclas evaluada. Luego de llevar a cabo el plan experimental, se concluye lo siguiente:

- Dada la poca cantidad de datos es difícil dar un dictamen del número de pasadas necesarias para alcanzar la densidad deseada. Sin embargo, se puede concluir que para tipo MD12, actualmente llamada MD19, 12 es el número de pasadas que parece ser el requerido para que se cumpla con la densidad solicitada en la tabla 620.12 de la especificación IDU 620-18.
- Para la mezcla asfáltica tipo MD10, sólo se cuenta con 1 toma de densidades, pero se encuentra que con 10 pasadas se cumple con la especificación IDU 620-18.
- Por su parte, la mezcla asfáltica tipo MCch19 requerirá más pasadas para cumplir con la densidad exigida, pero en las tomas de densidades que se realizaron, ninguna cumplió, con un máximo de 10 pasadas medidas.
- Es importante aclarar, que según lo encontrado en la revisión bibliográfica y lo encontrado en campo, que el densímetro electromagnético debe ser constantemente calibrado, para disminuir la incertidumbre de los datos tomados.
- Tal como se expuso en el marco teórico, la humedad influye significativamente en la medición de densidades con el densímetro electromagnético. Por esta razón, cuando comienza a llover, incluso con precipitaciones de baja intensidad, debe suspenderse la toma de densidades, ya que los datos obtenidos no serían confiables.
- Según lo observado durante la etapa experimental, se determinó que no es necesario disponer de más de un vibrocompactador en los frentes de obra. Se recomienda emplear exclusivamente vibrocompactadores mixtos, de manera que puedan cumplir simultáneamente las funciones de compactación y sellado de la mezcla asfáltica. Lo anterior, con el fin de evitar mayores costos en maquinaria, combustible y energía de compactación.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcaldía de Bogotá. (2024). *Plan Distrital de Desarrollo 2024-2027—Bogotá Camina Segura*.

ASTM. (2024). *Standard Test Method for Density of Bituminous Paving Mixtures in Place by the Electromagnetic Surface Contact Methods*.

<https://www.zotero.org/pedrofarrieta/items/NTX8B5FL/reader>

Caro, S., Diaz, A., Rojas, D., & Nuñez, H. (2014). A micromechanical model to evaluate the impact of air void content and connectivity in the oxidation of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 61, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.013>

Fitzgerald, B. (2002). *Evaluation of Non-Nuclear Gauges to Measure Density of Hot-Mix Asphalt Pavements Pooled Fund Study Final Report*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-Non-Nuclear-Gauges-to-Measure-Density-Fitzgerald/9c28c0a69cc84e0bc3f90fe3285544a9d33399e7>

Hausman, J. J., & Buttlar, W. G. (2002). Analysis of TransTech Model 300 Pavement Quality Indicator: Laboratory and Field Studies for Determining Asphalt Pavement Density. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1813(1), 191–200. <https://doi.org/10.3141/1813-23>

Henault, J. (2001). *Field Evaluation of a Non-Nuclear Density Pavement Quality Indicator*.

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

- Hu, J., Liu, P., Wang, D., Oeser, M., & Tan, Y. (2016). Investigation on fatigue damage of asphalt mixture with different air-voids using microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, 125, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.138>
- Hughes, C. S. (1989). *Compaction of asphalt pavement*. National Research Council, Transport. Res. Board.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2018). *Mezcla asfáltica en caliente densa, semidensa y gruesa*. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>
- Instituto Nacional de Vías. (2013a). *Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes recubiertos con una película de parafina*. INV-734-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>
- Instituto Nacional de Vías. (2013b). *Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos*. INV-733-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>
- Instituto Nacional de Vías. (2013c). *Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos*. INV-735-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>
- Instituto Nacional de Vías. (2013d). *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*. INV-736-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>
- Instituto Nacional de Vías. (2022). *Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico)*. Artículo 450. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

INVIAS. (2013). *Toma de muestras de mezclas asfálticas para pavimentos.*

<https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Kvasnak, A., Williams, C., Ceylan, H., & Kasthurirangan, G. (2007). *Investigation of Electromagnetic Gauges for Determining In-Place HMA Density.*

Leng, Z., & Al-Qadi, I. L. (2010). Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar: Laboratory Investigation and Field Validation. *Transportation Research Record*, 2159(1), 110–117.

<https://doi.org/10.3141/2159-14>

Leng, Z., & Al-Qadi, I. L. (2014). An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems. *NDT & E International*, 66, 90–

98. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.05.002>

Leng, Z., Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. (2011). Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models. *NDT & E International*, 44(4), 369–375.

<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.03.002>

Leng, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Yu, H., & Ling, T. (2018). Laboratory evaluation of electromagnetic density gauges for hot-mix asphalt mixture density measurement.

Construction and Building Materials, 158, 1055–1064.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.186>

Mason, M., & Williams, R. C. (2009). *Investigation of Electromagnetic Gauges for Determination of In-Place Density of HMA Pavements.*

	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Praticò, F. G., & Moro, A. (2011). In-lab and on-site measurements of hot mix asphalt density: Convergence and divergence hypotheses. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1065–1071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.071>

Rao, C., & Quintus, H. V. (2006). *Non Nuclear Density Testing Devices and Systems to Evaluate In-Place Asphalt Pavement Density*.

Rogge, D. F., & Jackson, M. (1999). *Compaction and Measurement of Field Density for Oregon Open-Graded (F-Mix) Asphalt Pavement*.

Romero, P., & Kuhnow, F. (2002). Evaluation of New Nonnuclear Pavement Density Gauges with Data from Field Projects. *Transportation Research Record*, 1813(1), 47–54. <https://doi.org/10.3141/1813-06>

Smith, B., & Diefenderfer, B. (2008). Comparison of Nuclear and Nonnuclear Pavement Density Testing Devices. *Transportation Research Record*, 2081, 121–129. <https://doi.org/10.3141/2081-13>

Troxler Electronic Laboratories Inc.s. (2020). *Manual of Operation and Instruction*.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

CONTROL DE GESTIÓN				
GESTIÓN	NOMBRE	CARGO / ROL	DEPENDENCIA	FIRMA
Elaboró:	Pedro Antonio Farieta Martínez	Contratista	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	
Revisó:	Franceth Justine Eduardo Castellanos Ballesteros	Profesional Especializado	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	
Aprobó:	Camilo Enrique Marrugo Martínez	Gerente	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	

CONTROL DE MODIFICACIONES			
VERSIÓN	SECCIÓN MODIFICADA	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
1			
2			
N			

El Documento 20251210232983 fue firmado electrónicamente por:	
CAMILO ENRIQUE MARRUGO MARTINEZ	Gerente, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1032387550, camilo.marrugo@umv.gov.co, Fecha de Firma: 22-08-2025 10:22:20
HUMBERTO RAMÍREZ GÓMEZ	Contratista, SUBDIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y APOYO LOGISTICO , ID: 19275301, humberto.ramirez@umv.gov.co, Fecha de Firma: 15-08-2025 15:30:34
PEDRO ANTONIO FARIETA MARTINEZ	, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1010220964, pedro.farieta@umv.gov.co, Fecha de Firma: 15-08-2025 11:28:51
FRANCETH JUSTINE EDUARDO CASTELLANOS BALLESTEROS	, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1136884262, franceth.castellanos@umv.gov.co, Fecha de Firma: 15-08-2025 11:31:10
 7be59442bcc3063baa91205500375c706587db427f30b329a863402e5701441b Codigo de Verificación CV: 8efce Comprobar desde: https://www.umv.gov.co/portal/verificar/	