

**IAG339-01-2013**  
**CORRELACIÓN DE MEDIDAS DE DENSIDAD DE MEZCLAS**  
**ASFÁLTICAS USANDO EQUIPOS NO NUCLEARES**  
**CORRELAÇÃO DE MEDIDAS DE DENSIDADE DE MISTURAS DE**  
**ASFALTO, UTILIZANDO EQUIPAMENTO NÃO NUCLEAR**

Antonio José Segovia Nájera  
PUCE  
Quito, Ecuador  
ajsegovia@puce.edu.ec

## **Resumen**

El uso de equipos no nucleares para medida de densidad de mezclas asfálticas en campo, representa una ventaja al disminuir los tiempos de lectura durante operaciones de compactación, liberar al usuario de los riesgos inherentes al uso de equipos con fuentes radioactivas y evitar los trámites para obtener licencias de operación. Sin embargo, se ha demostrado en distintos estudios que es necesario completar un proceso cuidadoso de calibración para que el error de medida sea aceptable para efectos de control de calidad. Este estudio presenta correlaciones obtenidas con tres distintos tipos de mezcla asfáltica en caliente, que fueron aplicados en la pavimentación del nuevo aeropuerto Mariscal Sucre, en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.

## **Resumo**

A utilização de equipamento não nuclear para medir a densidade de misturas de asfalto na área, é uma vantagem para reduzir os tempos de leitura durante as operações de compactação, libertando o utilizador contra os riscos inerentes à utilização de equipamento com fontes radioactivas e evitar os processos de obtenção licenças de exploração. No entanto, tem sido demonstrado em vários estudos que sejam necessárias para completar um processo cuidadoso de calibração para o erro de medição é aceitável para efeitos de controlo de qualidade. Este estudo apresenta correlações obtidas com três diferentes tipos de mistura asfáltica a quente, que foram aplicados na pavimentação do novo aeroporto Mariscal Sucre, no Distrito Metropolitano de Quito, no Equador.

## **INTRODUCCIÓN**

Los procesos de control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas involucran una serie de ensayos, entre los cuales está la medida de densidad. La densidad *bulk*, tal como la define la norma ASTM D2726 - 11, es la masa de un metro cúbico de material a 25 °C. La densidad es utilizada como una aproximación para la determinación de la rigidez de la mezcla (Sargand et al, 2005), la cual puede ser relacionada con un nivel de desempeño relativo en las condiciones para las que fue diseñada dicha mezcla. Los efectos de desviaciones en los valores de densidad de campo, respecto de los valores de diseño (considerando que estos últimos sean apropiados), pueden conducir a la mezcla a fenómenos como *ahuellamiento*, oxidación, desprendimiento de

agregados y fisuras (Brown et al, 2004). Teniendo en cuenta que los métodos de ensayo para determinar la densidad incluyen un error de medida, es necesario elegir un método que sea apropiado para fines de aceptación del material colocado y el control de su producción (control de compactación). El método a ser elegido deberá seleccionarse de acuerdo a su desviación aceptable respecto de una medida de densidad en una muestra patrón. La variabilidad admitida en la medida de densidad dependerá del propósito de la medida, sea este para control de calidad o aseguramiento de la calidad (Romero, 2002).

Actualmente en Ecuador, para fines de control y aseguramiento de la calidad, son utilizados dos métodos sobre muestras de campo: la densidad de núcleos extraídos y ensayados en laboratorio (norma ASTM D2726) y la densidad in situ con densímetro nuclear (norma ASTM D2950/D2950M). Las Especificaciones Generales para Caminos y Puentes (MOP-001-F-2002), vigentes en el país, exigen la extracción de un mínimo de 3 núcleos, además de al menos 15 medidas de densidad con densímetro nuclear, por cada 10,000 m<sup>2</sup> o cada 1,000 t de mezcla asfáltica producida, con el fin de comprobar la densidad del sitio.

En general, el uso de las densidades de núcleos extraídos en el campo es el método preferido para determinar la aceptación de las mezclas compactadas, aunque la perforación de la capa de estudio puede generar imperfecciones (Kvasnak et al, 2007). Por otro lado, es muy conocido que el uso de densímetros nucleares está asociado a riesgos para la salud (principalmente del operador), por la exposición a fuentes radioactivas, además de altos costos de implementación de medidas de seguridad para su uso y almacenamiento, entrenamiento especializado de los operadores, mantenimiento, calibración y procesos gubernamentales para obtención de licencias de operación, los cuales pueden consumir mucho tiempo.

Con la introducción de los densímetros eléctricos en 1998 (Sawchuk, 1998), los cuales no generan emisiones nocivas para la salud e inclusive se presentan como una alternativa más barata, sumando sus costos de operación anuales frente a los de densímetros nucleares (Williams, 2008), se ha abierto una discusión sobre la factibilidad de su uso como un reemplazo efectivo del densímetro nuclear, lo cual ha motivado distintos estudios comparativos en los últimos años.

El presente estudio pretende complementar la evaluación de este tipo de equipos no nucleares, a través del análisis estadístico de la vasta información generada en el proyecto de pavimentación del nuevo aeropuerto Mariscal Sucre, en Quito (Ecuador), entre junio de 2011 y enero de 2012.

## **ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN**

Como se mencionó, varios autores han presentado investigaciones sobre el desempeño de los densímetros no nucleares disponibles en el mercado.

Entre algunos de estos trabajos se destaca la investigación de Romero (2002), quien analiza las versiones iniciales de dos modelos de densímetros eléctricos (PQI y PaveTracker) y un densímetro nuclear, comparando los resultados con la densidad de núcleos, en un estudio de fondos comunes en 6 estados de Estados Unidos, en base a un número limitado de muestras seleccionadas en varios proyectos de pavimentación. El autor concluye que ambos equipos pueden ser usados para procesos de control de calidad, pero debido a la dificultad para obtener

una calibración de los densímetros con los mismos materiales, éstos no se consideran adecuados para tareas de aseguramiento de la calidad.

Más adelante, Sargand et al (2005), plantearon un estudio que contempló en una evaluación de laboratorio, donde examinan la incidencia en el PaveTracker de distintas variables (temperatura, humedad superficial, humedad interna, granulometría, área de medida, profundidad de la capa y exactitud de la medida después de calibrado el equipo) sobre la calidad de las lecturas del densímetro eléctrico frente a las medidas de densidad de núcleos. Se encontró que para el modelo evaluado, la medida de densidad se afectaba con la presencia de humedad, un espesor de la capa medida menor a la profundidad de medida del equipo y en medidas sobre mezclas gruesas. Luego, en una etapa de evaluación de campo, se compararon las medidas no calibradas de los dos modelos de densímetros existentes (PQI y PaveTracker) contra las medidas de densidad de núcleos o las obtenidas con densímetro nuclear. Se trabajaron con tres tipos de mezclas con distinto tamaño nominal máximo, en 24 proyectos en el estado de Ohio, Estados Unidos. En la mayoría de los proyectos se tomaron hasta un total de 10 muestras. Los autores concluyeron que con medidas no calibradas, los densímetros eléctricos difieren estadísticamente de las medidas de densidad de núcleos y nuclear. Posteriormente, aplicando una calibración a las lecturas con un desplazamiento basado en valores de núcleos, se encontró que uno de los dos modelos (PQI) se ajustó adecuadamente a las medidas de los núcleos. Se recomienda el uso de ambos modelos para propósitos de control de calidad y se sugiere una investigación futura para la implementación de medidas de rigidez en lugar de densidad para aseguramiento de la calidad.

De manera similar, Kvasnak et al (2007), emprendieron un estudio basado en muestras de 15 proyectos del estado de Iowa, Estados Unidos, entre los mismos modelos de densímetros eléctricos, comparando su desempeño contra las densidades de núcleos. Se trabajó con dos tipos de mezcla asfáltica. En esta investigación, al igual que en otros trabajos, se recomienda la implementación de franjas de prueba para el ajuste de las medidas con cada mezcla específica, coincidiendo también en que ambos modelos pueden ser usados para propósitos de control de calidad, pero anotando que las lecturas de ambos modelos difieren entre sí cuando se aplican factores de corrección a las lecturas crudas.

Merece mencionarse el trabajo de Williams (2008), donde sobresale un análisis de las lecturas del PaveTracker y del PQI, aplicando distintas técnicas de calibración. El estudio se basó en los datos de dos tipos de mezclas (12.5 y 37.5 mm) en 16 sitios distintos de muestreo, con un número limitado de muestras. Se concluye que el método recomendado por la normativa ASTM D7113/D7113M, el cual comprende la aplicación de un factor de desplazamiento de las medidas crudas, basado en la diferencia promedio de las lecturas crudas y las lecturas correspondientes de densidad de núcleos, es aplicable cuando el rango de densidades es corto. Contrastando con este hallazgo, se mencionan las bondades del método de calibración por pares de datos versus los otros métodos de calibración. Sin embargo, el estudio utiliza como referencia las medidas del densímetro nuclear en lugar de la densidad de núcleos, encontrándose con la conclusión (que era esperada) que la exactitud de este método depende de la exactitud de las lecturas del nuclear.

Finalmente, dentro de un estudio más amplio que abarca distintas técnicas de evaluación no destructiva de los pavimentos, Von Quintus et al (2009) refuerzan la idea de la conveniencia de estos equipos para el control de calidad.

## **DENSÍMETROS ELÉCTRICOS**

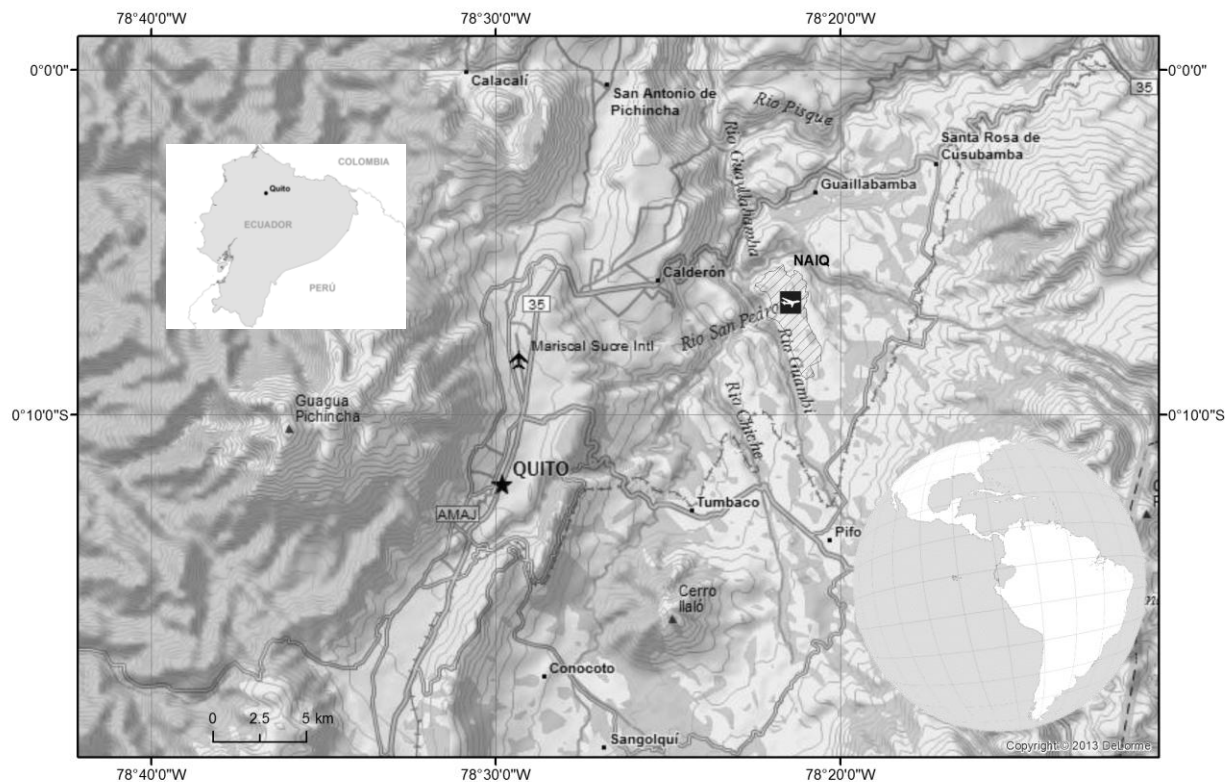
A pesar que no es posible comparar los principios y tecnologías de operación por la reserva existente entre los fabricantes (Romero, 2002), se puede decir en forma general, que los densímetros eléctricos provocan un campo eléctrico que se forma por la emisión de una carga eléctrica a un conductor. Este campo eléctrico se ve afectado por la interferencia de un material poco conductor o dieléctrico (la mezcla asfáltica). A su vez, los distintos cambios que pueden detectarse en el campo eléctrico, que están relacionados en magnitud con el porcentaje de vacíos de aire y el tipo de materiales usados en la mezcla (Sargand et al, 2005), pueden ser transformados a un valor de densidad de referencia o patrón. De aquí se explica que la densidad que arroja un densímetro eléctrico es una densidad relativa a un determinado patrón de densidad conocida (Romero, 2002). Por esta razón, se hace necesaria una calibración para una mezcla específica para estimar con un cierto margen de error la densidad de campo.

## **DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO**

La investigación se centra sobre el análisis estadístico de pares de datos de densidad obtenidos entre núcleos de mezclas asfáltica en caliente y dos densímetros eléctricos nuevos del mismo modelo (PaveTracker). Los datos han sido recopilados de los registros de control de densidad del proyecto de pavimentación del nuevo aeropuerto Mariscal Sucre de Quito, entre junio de 2011 y enero de 2012.

### **Ubicación del Proyecto**

El nuevo aeropuerto de Quito (NAIQ) está ubicado a 10 km hacia el oriente de Quito (Figura 1), en la provincia de Pichincha, Ecuador. La elevación aproximada del proyecto es de 2400 m.s.n.m.



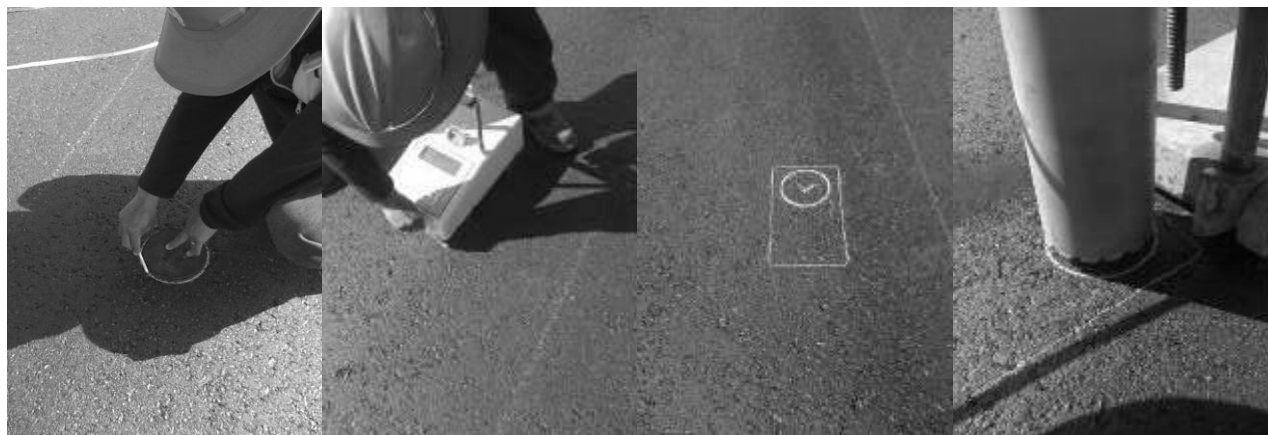
**Figura 1: Ubicación del nuevo aeropuerto de Quito**  
**Mezcla Asfáltica en el Proyecto**

Las medidas de densidad se tomaron en muestras de tres mezclas densas distintas colocadas en la pista y calles de rodaje del “lado aire” (sector de circulación de aeronaves). Se colocaron dos capas consecutivas de base estabilizada con asfalto con un tamaño nominal máximo (TNM) de 19.0 mm. Sobre estas capas se colocó una base asfáltica con un TNM de 19.0 mm. Como capa de superficie, se colocó una mezcla de TNM 12.5 mm. Los espesores de cada capa varían de acuerdo con el sector de diseño del pavimento, contabilizándose 8 estructuras distintas con espesores que varían desde 50 hasta 77 mm para cada capa. El agregado para la base estabilizada con asfalto y parte de la base asfáltica provino de una cantera de Guayllabamba, mientras el resto de capas fueron fabricadas con agregado de una cantera cercana a la población de Pifo. El *ligante* utilizado tiene un grado nominal PG70-10, aunque la diferencia real entre la temperatura alta y baja es mayor. El porcentaje medio de vacíos de aire es de 4%.

## Muestreo

Los sitios de muestra se determinaron de manera aleatoria de acuerdo a los procedimientos de la norma ASTM D3665. Los sectores previamente compactados fueron marcados y se ejecutaron medidas de densidad crudas (sin corrección) con cada uno de los densímetros eléctricos (61659 y 61520) conforme a la norma ASTM D7113/D7113M. Posteriormente, se extrajeron núcleos de los sitios de prueba, los cuales fueron cortados (Fotografía 1) y procesados en el laboratorio del proyecto para obtener densidad *bulk* mediante el estándar ASTM D2726. Siguiendo recomendaciones del fabricante, las medidas de densidad con densímetro eléctrico no se

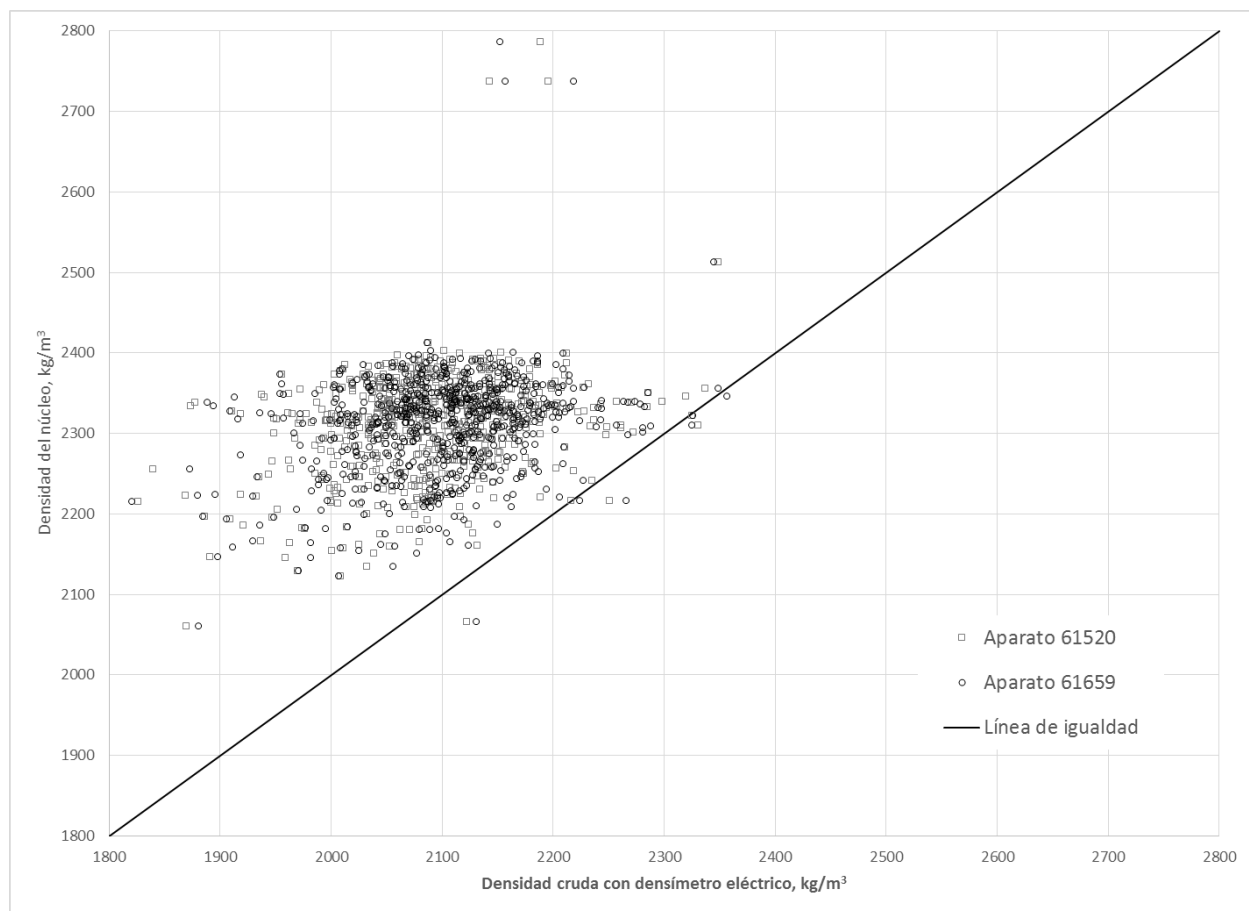
ejecutaron a menos que la superficie esté completamente seca y libre de escombros. En cada punto se tomaron cuatro medidas distintas, siguiendo siempre un mismo patrón de orientación, paralelo a la dirección de compactación. Las medidas fueron promediadas para determinar el valor característico del punto de ensayo. Se obtuvieron 658 núcleos durante el período de estudio, para un total de 1316 pares de datos (considerando ambos equipos). Los huecos dejados por el muestreo de núcleos, una vez limpios de escombros y con su superficie seca, fueron llenados y compactados con mezcla asfáltica en caliente del mismo tipo.



**Fotografía 1: Secuencia de muestreo de densidades y núcleos**

## **Calibración**

Para el ajuste de datos se utilizó la técnica de pares de datos entre los valores crudos de cada densímetro y el valor de densidad *bulk* correspondiente al núcleo. A partir de los pares de datos se establece una relación lineal entre los valores crudos y los valores de referencia (núcleos). Debido a que la producción de mezcla normalmente tiene desviaciones por factores como granulometría y contenido de *ligante*, además del factor particular de cambio de fuente de agregados (explicado arriba), se generaron un total de 28 ecuaciones, distribuidas de la siguiente manera: 11 ecuaciones para base estabilizada con asfalto, 8 para base asfáltica y 9 para capa de superficie. La Figura 2 muestra la dispersión de valores de densidad cruda (sin calibración) de cada densímetro, comparados con el valor de densidad del núcleo.



**Figura 2: Densidad cruda versus densidad de núcleos**

## Valores atípicos

Se identificaron los valores atípicos y se analizó su pertenencia a la muestra utilizando los criterios de la norma ASTM E178. Se analizaron dos casos. El primer caso fue rechazar los valores de núcleos con densidades *bulk* iguales o superiores a  $2500 \text{ kg/m}^3$ , considerándose como un error del operador, debido a que la estadística de todas las mezclas analizadas durante el proyecto, no evidenciaba valores de densidad teórica máxima (vacíos de aire = 0 %) superiores a dicho valor de referencia. Con este criterio se rechazaron 5 pares de datos cuya diferencia absoluta era mayor que  $200 \text{ kg/m}^3$ , y un par de datos con una diferencia de  $156 \text{ kg/m}^3$ . Además se rechazó un par cuyo valor predicho de densidad era  $2719 \text{ kg/m}^3$ , con una diferencia absoluta de  $504 \text{ kg/m}^3$ , correspondiente a un error de medida comprobado en campo y atribuido al operador. Rechazados los 7 pares iniciales, se evaluaron las diferencias absolutas de densidad entre los dos métodos, estableciéndose de la distribución de diferencias, que con una probabilidad menor al 1 %, las diferencias absolutas superarían el valor de  $89 \text{ kg/m}^3$ . Con este criterio se rechazaron 52 pares de valores que superan  $89 \text{ kg/m}^3$ , con un riesgo de menos del 1% de rechazar erróneamente una buena observación. De este modo, la muestra a ser evaluada se reduce a 1256 pares de datos entre los dos equipos.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se ha decidido hacer dos tipos de análisis para el conjunto de pares de datos: un análisis de correlación, para determinar qué tan bien el cambio de densidades corregidas, medidas con un densímetro eléctrico, describen el cambio de las densidades *bulk* de los núcleos. Por otro lado, se efectuó una prueba de hipótesis, comparando las medias de la serie de densidades *bulk* de núcleos y las densidades ajustadas del densímetro eléctrico, mediante el método de los pares de datos. La hipótesis nula se estableció para probar que la diferencia entre las dos medias no supera  $-3.2 \text{ kg/m}^3$ , que es la precisión declarada por el fabricante frente a un valor de referencia conocido. El nivel de significancia elegido para esta prueba es de 0.05.

## Análisis de correlación

Se ha encontrado una relación lineal entre las series de datos, con un coeficiente de determinación de 0.79. El error estándar de la estimación  $s_e$  es igual a 26.75, es decir que el 95.5% de los pares de datos evaluados está en un rango de error  $\pm 53.50 \text{ kg/m}^3$  de la línea de estimación. La Figura 3 presenta una representación de la línea de estimación de la muestra, junto con los intervalos de error de la estimación.

## Prueba de hipótesis

El error estándar estimado de la diferencia de dos medias se expresa con la ecuación siguiente:

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_1^2}{n_1} + \frac{\hat{\sigma}_2^2}{n_2}} \quad (1)$$

Donde:

$\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$	Error estándar estimado de la diferencia entre dos medias
$\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2$	Varianzas estimas de las poblaciones
$n_1, n_2$	Tamaños de las muestras

Luego, se calcula la diferencia estandarizada de las medias con la siguiente expresión:

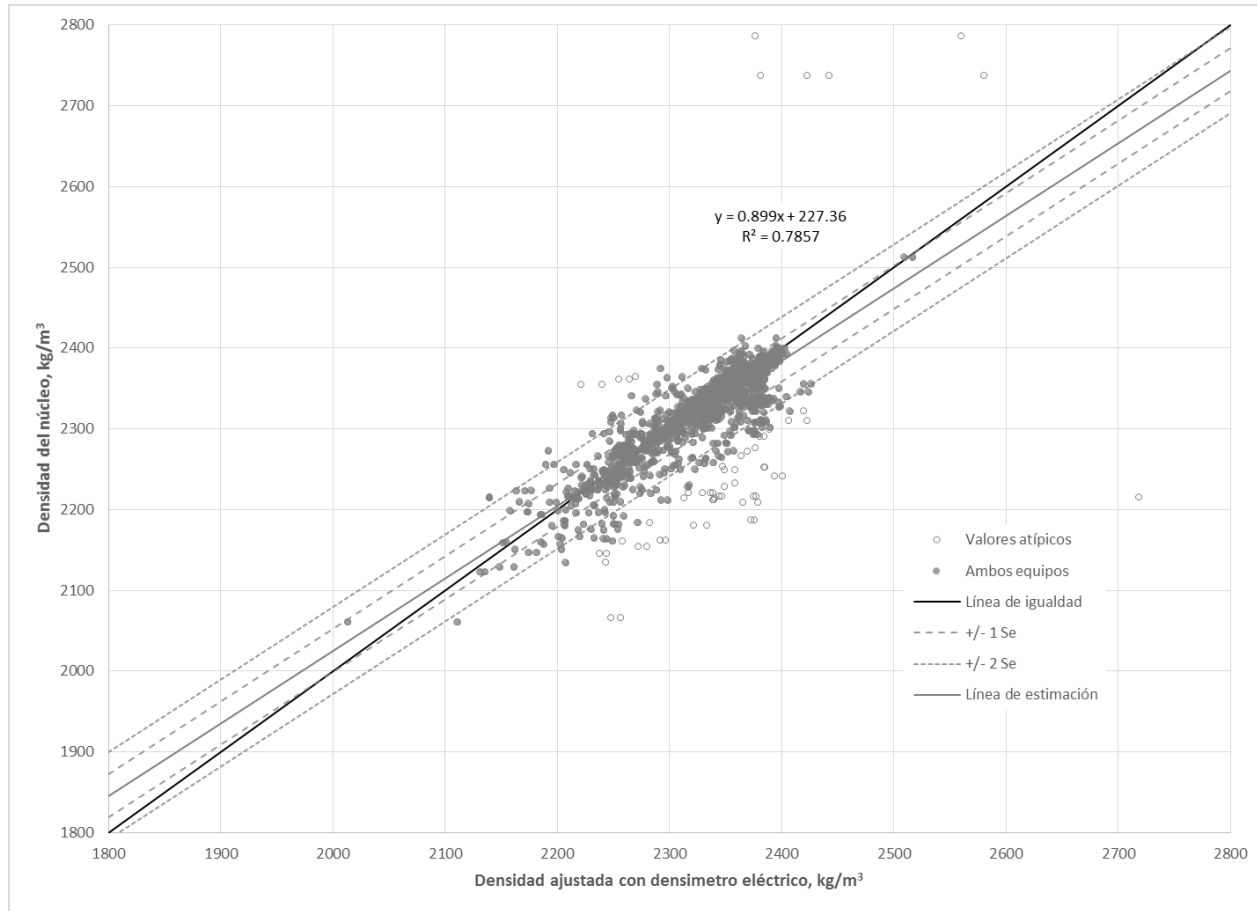
$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_{H_0}}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad (2)$$

Donde:

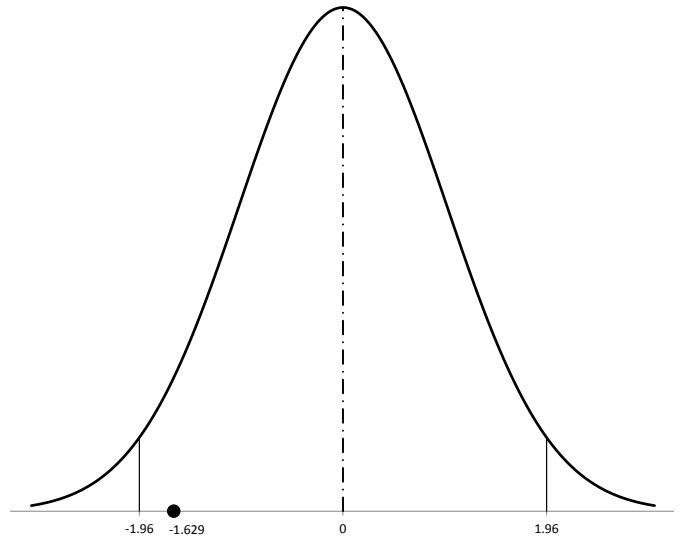
$z$	Diferencia estandarizada entre las medias de las muestras
$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)$	Diferencia de las medias de las muestras
$(\mu_1 - \mu_2)_{H_0}$	Hipótesis nula, $(\mu_1 - \mu_2) = -3.2$



De este modo, el valor  $z$  para esta serie de datos es de  $-1.629$ , el cual se encuentra dentro del rango de aceptación de la distribución, como se muestra en la Figura 4, lo cual demuestra que las diferencias de los valores del densímetro eléctrico respecto a los valores de referencia (núcleos), no son significantes para la precisión esperada. Si se realizara esta misma prueba para una hipótesis nula ( $(\mu_1 - \mu_2) = 0$ ), la hipótesis sería rechazada, es decir que los datos en general tienen una diferencia estadísticamente significativa.



**Figura 3: Correlación entre densidad ajustada y densidad de núcleos**



**Figura 4: Prueba de hipótesis de la diferencia de las medias**

## CONCLUSIONES

El autor concluye que las pruebas presentadas en este estudio, aunque limitadas, por tratarse de un solo proyecto, complementan positivamente los hallazgos de investigaciones anteriores, al tratar el desempeño de un par de densímetros eléctricos en distintas mezclas, sobre el análisis de un grupo de puntos. El análisis estadístico demuestra que la ecuación de correlación obtenida, representa aceptablemente la predicción de los cambios de una variable respecto a los cambios de la otra, además de tener una diferencia dentro de la precisión del equipo, que no es estadísticamente significativa.

Se observa que la aplicación de una calibración de mezcla es necesaria para motivos de predicción de la densidad en campo y que el método de calibración de pares de puntos funciona aceptablemente, aunque requiere de una frecuencia de actualización en función de la variación de las características de la mezcla. La aplicación de un desplazamiento vertical únicamente, no habría funcionado con la muestra, debido a la pendiente de la dispersión respecto a la línea de igualdad (ver Figura 2).

## RECOMENDACIONES

Se recomienda la ampliación de este tipo de estudios para mezclas producidas en Ecuador, para establecer conclusiones determinantes sobre el uso de densímetros eléctricos para propósitos de aseguramiento de la calidad. En base a los hallazgos de este estudio, se propone el uso en Ecuador de densímetros eléctricos para control de calidad en proyectos de pavimentación de mezclas asfálticas, como una alternativa al uso del densímetro nuclear, siempre que el mismo esté atado a un proceso estricto de calibración, con el suficiente número de muestras.

Finalmente, se recomienda la inclusión del método de pares de puntos en la norma ASTM D7113/D7113M, como una alternativa para la calibración de los datos de densidad cruda.

## REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials (2011). Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures. ASTM D2726 -11. Annual book of ASTM standards. Vol. 04.03.
- American Society for Testing and Materials (2010). Standard test method for density of bituminous paving mixtures in place by the electromagnetic surface contact methods. ASTM D7113/D7113M -10. Annual book of ASTM standards. Vol. 04.03.
- Von Quintus, H., Minchin, R., Nazarian, S., Maser, K., Prowell, B. (2009). NDT technology for quality assurance of HMA construction. NCHRP Report No. 626. Transportation Research Board, Washington.
- Williams, S. (2008). Non-nuclear methods for HMA density measurements. Report No. MBTC 2075. University of Arkansas, Fayetteville.
- Kvasnak, P., Williams, C., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. (2007). Investigation of electromagnetic gauges for determining in-place HMA density. Report No. IHRB Project TR-547. Iowa State University, Ames.
- Sargand, S., Kim S., Farrington, S. (2005). A working review of available non-nuclear equipment for determining in-place density of asphalt. Report FHWA/OH-2005/18, Ohio Department of Transportation.
- Brown, E., Hainin, M., Cooley, A., Hurley, G. (2004). Relationship of air voids, lift thickness, and permeability in hot mix asphalt pavements. NCHRP Report No. 531. Transportation Research Board, Washington.
- Romero, P. (2002). Evaluation of non-nuclear gauges to measure density of hot-mix asphalt pavements. The University of Utah.
- Sawchuk, P. (1998). Pavement Quality Indicator: Field operational testing and product transfer. Report No. NCHRP-47. Transportation Research Board. Washington.