

**IAG412-03-2013**  
**EFEECTO DE LA INSTRUMENTACIÓN DE PISTAS EXPERIMENTALES**  
**EN LA DENSIDAD EN SITIO**

Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D., MBA  
Investigador. Unidad de Materiales y Pavimentos  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,  
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica  
Teléfono: (506) 2511-2529 / Fax: (506) 2511-4440  
E-mail: [fabricio.leiva@ucr.ac.cr](mailto:fabricio.leiva@ucr.ac.cr)

Ing. Adriana Vargas Nordcbeck, Ph.D., MBA  
Investigadora/Profesora. Unidad de Materiales y Pavimentos  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica,  
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica  
Teléfono: (506) 2511-2539 / Fax: (506) 2511-4440  
E-mail: [adriana.vargasnordcbeck@ucr.ac.cr](mailto:adriana.vargasnordcbeck@ucr.ac.cr)

Ing. David Timm, Ph.D., PE  
Brasfield & Gorrie Professor of Civil Engineering, Auburn University, 238 Harbert Engineering  
Center, Auburn, AL 36849; PH (334) 844-6282;  
E-mail: [timmdav@auburn.edu](mailto:timmdav@auburn.edu)

## **Resumen**

Los ensayos acelerados a escala natural suelen incluir sensores para medir respuesta mecánica dentro de la estructura de pavimento. Estos sensores como agentes externos a una estructura convencional de pavimento podría generar efectos negativos en las propiedades del pavimento. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial efecto de la instrumentación en la densidad in situ del pavimento. En el año 2009, durante la construcción de dos tramos de ensayo en la pista de ensayo del Centro Nacional de Tecnología de Asfalto (NCAT) se determinó la densidad de la carpeta asfáltica colocada encima de un arreglo de sensores y se procedió a la extracción de muestras conteniendo sensores embebidos en la misma capa. Tanto la densidad como la extracción de los núcleos fueron tomadas dentro y fuera del arreglo de los sensores para realizar comparaciones estadísticas. En cuanto a la densidad de la carpeta asfáltica, los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas y por consiguiente ningún efecto negativo causado por la presencia de instrumentación en esta capa. Por otro lado, aunque se determinó que las muestras que contenían los sensores resultaron con densidades mas bajas que las muestras inalteradas estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. En conclusión, se podría establecer que la presencia de instrumentación no alteró significativamente la uniformidad de la estructura de pavimento y por lo tanto no afectó los resultados de respuesta mecánica.

## **Resumo**

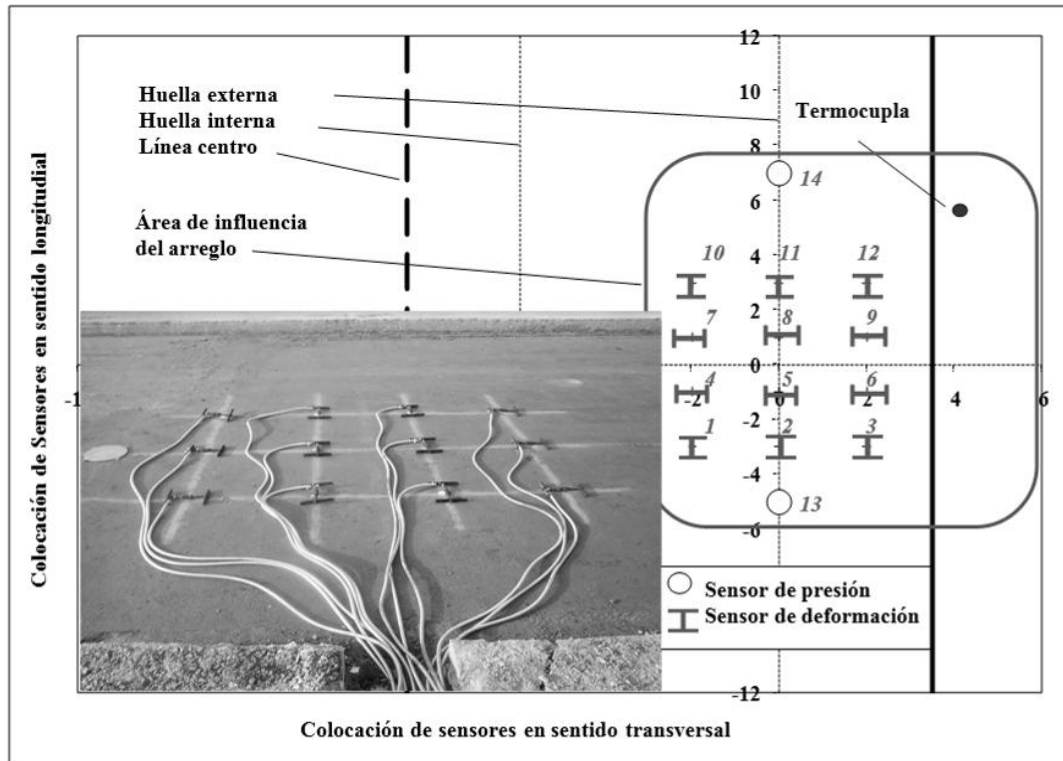
Os ensaios acelerados em escala natural incluem sensores para medir a resposta mecânica dentro da estrutura de pavimento. Estes sensores como agentes externos a uma estrutura convencional de pavimento puder gerar efeitos negativos nas propriedades do pavimento. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito potencial da instrumentação na densidade in situ do pavimento. Em 2009, durante a construção de duas seções de ensaio na pista de ensaio do Centro Nacional de Tecnologia de Asfalto (NCAT) foi determinada a densidade da camada de asfalto colocada em cima de um conjunto de sensores e procedeu-se à extração das mostras que contêm os sensores embutidos na mesma camada. Tanto a densidade como a extração dos núcleos foram feitas dentro e fora do conjunto de sensores para fazer comparações estatísticas. Em relação à densidade da mistura asfáltica, os resultados mostraram que não há diferenças significativas e, por tanto, nenhum efeito negativo causado pela presença da instrumentação nesta camada. Por outro lado, embora tenha sido determinado que as mostras contendo os sensores tinham densidades mais baixas que as mostras inalteradas essas diferenças não foram estatisticamente significativas. Em conclusão, é possível afirmar que a presença de instrumentação não alterou significativamente a uniformidade da estrutura de pavimento e, por conseguinte, não afetou os resultados da resposta mecânica.

## INTRODUCCIÓN

El uso de instrumentación en pavimentos permite monitorear respuestas mecánicas críticas de la estructura ante condiciones de carga y condiciones ambientales. Los ensayos acelerados de pavimentos a escala natural como el que se encuentra desarrollado por el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT en inglés) aprovechan el uso de sensores para medir esfuerzos y deformaciones unitarias las cuales están directamente relacionadas con el desempeño del pavimento (*Timm et al., 2004; Timm, 2008; Timm, 2009*).

Cada pieza de instrumentación o sensor se puede ver como un agente externo a la estructura típica de pavimento que tiene el potencial de causar un cambio en las propiedades o desempeño del pavimento. Muchos de estos sensores están hechos de materiales livianos como el nylon o teflon lo cual puede causar zonas de baja densidad. La colocación e instalación de ciertos sensores conlleva a una modificación en el proceso constructivo como retrasos y dificultades en el proceso de control de calidad (*Llenin et al., 2006*). Adicionalmente, se han reportado casos donde el desempeño del pavimento ha sido afectado por la presencia de instrumentación. En un caso con fatiga prematura (*Hugo et al., 1997*) y otro caso altas deformaciones permanentes (*Mulvaney, 2004*) debido a la pobre compactación o baja densidad en el área de los sensores.

La Figura 1 muestra el arreglo típico utilizado en la pista a escala natural del NCAT. Este arreglo consiste en 12 sensores de deformación unitaria y 2 celdas de presión. La instrumentación completa está centrada en la huella derecha y se observa en la misma figura como no solo son los sensores los que podrían introducir cambios en la estructura del pavimento, pero también los cables extienden el área de influencia del arreglo. Adicional a la presencia de los sensores cabe destacar que antes de colocar la mezcla asfáltica se coloca una capa delgada fina de mezcla sobre el sensor para protegerlo ante la pasada de los compactadores. Esta mezcla fina aunque es tomada de la mezcla por colocar, se caracteriza por tener mayor contenido de asfalto y menor densidad, lo cual también puede afectar la uniformidad de la capa asfáltica. Debido a todas estas irregularidades encontradas en el proceso constructivo de tramos de prueba instrumentados se decidió evaluar el potencial efecto negativo que podría tener la presencia de sensores sobre la calidad de la capa asfáltica.



**Figura 1: Arreglo de instrumentación**

## OBJETIVO

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el potencial efecto negativo sobre la uniformidad de la estructura de pavimento debido a la presencia de sensores.

## METODOLOGÍA

Para cumplir con el objetivo de este estudio se procedió a realizar ensayos de densidad de la capa asfáltica, en el año 2009, durante la construcción de dos tramos de ensayo en la pista de ensayo del Centro Nacional de Tecnología de Asfalto (NCAT). Se midió la densidad de la carpeta asfáltica colocada encima de un arreglo de sensores y se procedió a la extracción de muestras conteniendo sensores embebidos en la misma capa. Tanto densidad como extracción de núcleos para determinar densidad, fueron tomadas dentro y fuera del arreglo de los sensores para realizar comparaciones estadísticas.

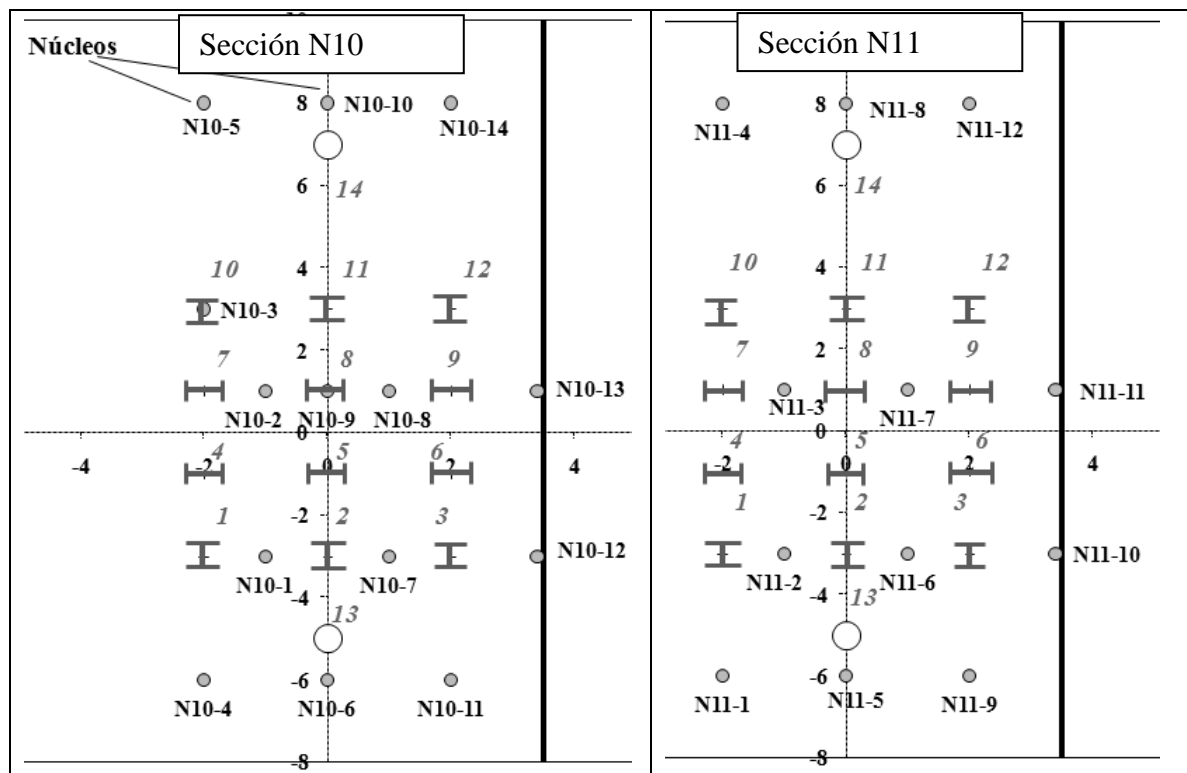
## Tramos de prueba

En el año 2009, en la pista a escala natural del NCAT se procedió a reemplazar 2 tramos experimentales que contenían el arreglo de sensores mostrado en la Figura 1. Estos tramos

comparten los mismos materiales, espesores y mismos esfuerzos de compactación, siendo la única diferencia la temperatura de mezclado y compactación ya que una de las secciones fue diseñada con mezcla tibia espumante.

## Parte 1: Análisis de núcleos

Para esta parte del estudio se tomaron 6 núcleos dentro de la zona de influencia del arreglo y 6 núcleos se tomaron fuera de esta zona. La Figura 2 muestra la localización aproximada de los núcleos con respecto al arreglo de sensores. La gravedad específica para cada espécimen fue calculada mediante AASHTO T166 y la correspondiente densidad máxima teórica con AASHTO T209. La Tabla 1 muestra los resultados de contenido de vacíos de aire para cada espécimen. Para el análisis estadístico se formaron 2 grupos o tratamientos: fuera del arreglo OUT y dentro del arreglo IN.

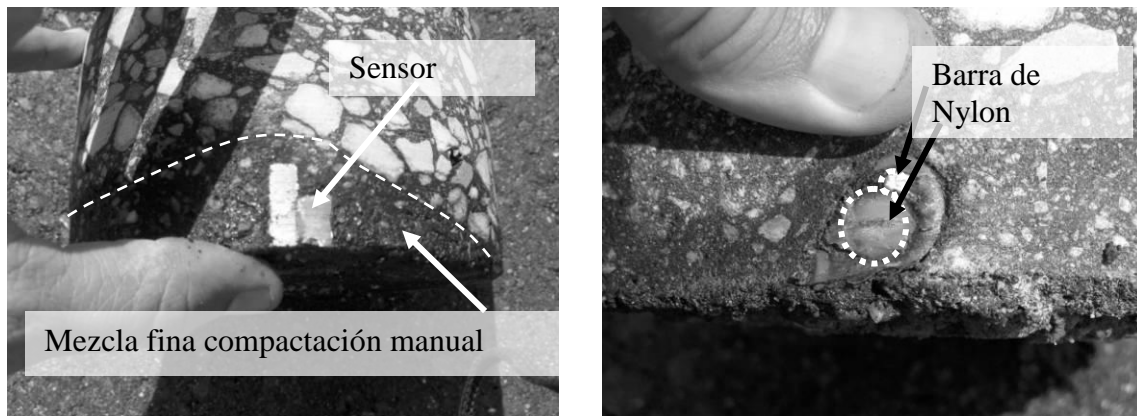


**Figura 2: Localización de extracción de núcleos**

Como puede observarse en la Tabla 1 para la sección N10 el promedio de vacíos de aire para el grupo OUT fue de 6.1% y para la sección N11 de 6.7%. Por otro lado se obtuvo vacíos de aire de 6.8% y 6.4% para las secciones N10 y N11 respectivamente para el tratamiento IN. Investigación más profunda de los resultados obtenidos para N10 con mayor contenido en vacíos de aire dentro del arreglo (IN) indicaron que el mayor contenido promedio de vacíos se debió a que el espécimen N10-12 contenía parte de un sensor de deformación (Figura 3) lo que provocó una zona de menor densidad. Sin embargo, a partir de un análisis estadístico comparativo tipo t-de-student de 2 colas se determinó que no hay evidencia estadística al 95% de nivel de confianza para decir que los contenidos de vacíos de aire son diferentes para las secciones y tratamientos estudiados.

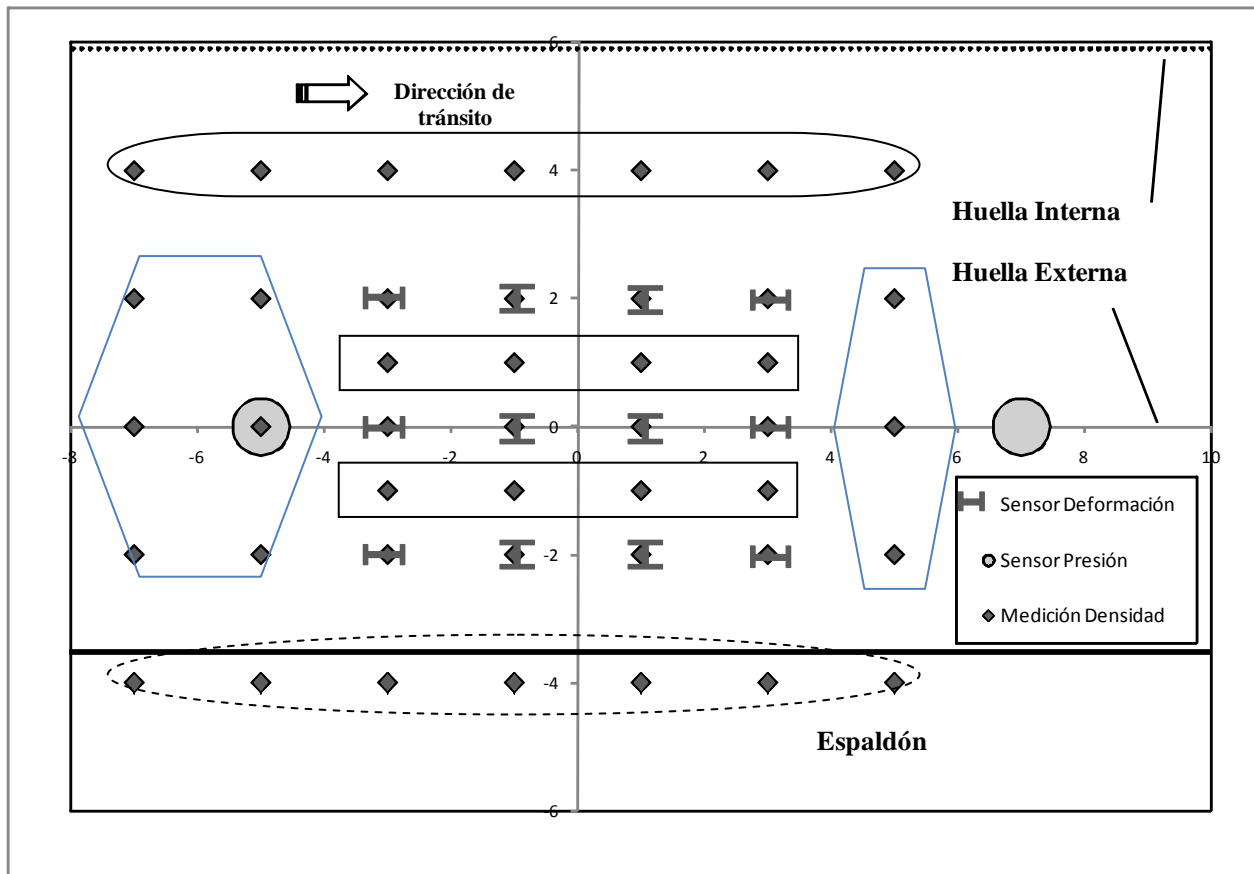
**TABLA 1: Contenido de vacíos de aire**

Sección N10			Sección N11		
ID	Localización	V. Aire, %	ID	Localización	V. Aire, %
N10-1	IN	6.5	N11-2	IN	6.3
N10-2	IN	6.8	N11-3	IN	6.1
N10-7	IN	6.9	N11-6	IN	6.4
N10-8	IN	6.2	N11-7	IN	6.5
N10-12	IN	8.0	N11-10	IN	6.4
N10-13	IN	6.6	N11-11	IN	6.7
Promedio		6.8	Promedio		6.4
N10-4	OUT	6.3	N11-1	OUT	6.5
N10-5	OUT	5.8	N11-4	OUT	6.2
N10-6	OUT	5.7	N11-5	OUT	7.4
N10-10	OUT	5.4	N11-8	OUT	6.8
N10-11	OUT	6.8	N11-9	OUT	6.3
N10-14	OUT	6.5	N11-12	OUT	6.9
Promedio		6.1	Promedio		6.7

**Figura 3: Especímenes extraídos conteniendo sensores**

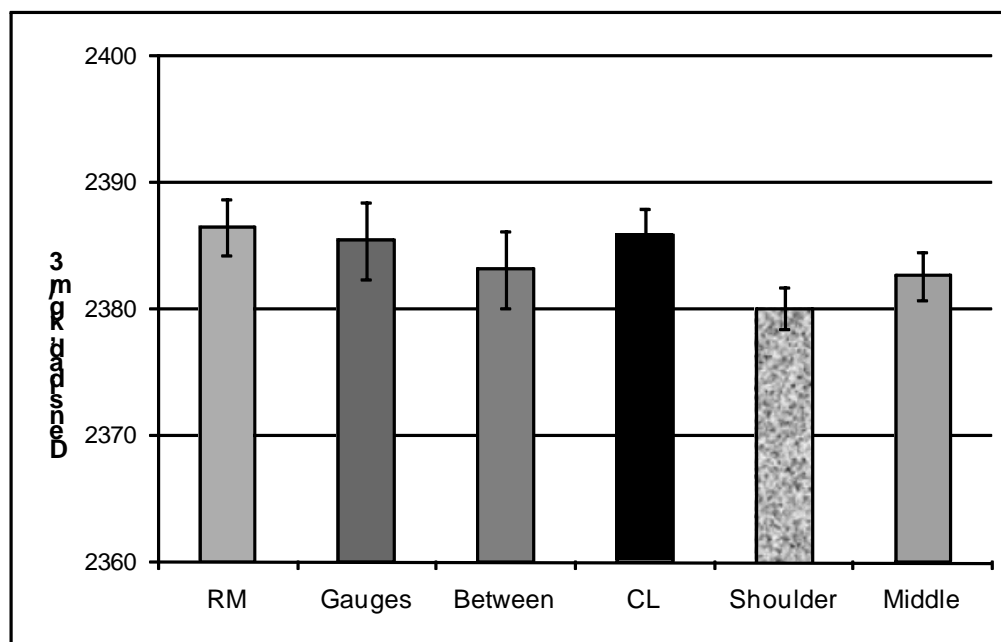
## Parte 2: Análisis de densidad

La segunda parte de este estudio involucró el uso del Indicador de Calidad del Pavimento (PQI en inglés) para medir la densidad relativa dentro y fuera del arreglo de las secciones estudiadas. Los resultados de estas mediciones fueron comparados contra los resultados de aceptación de calidad de la mezcla asfáltica. Estas mediciones de calidad fueron tomadas en puntos aleatoriamente seleccionados y se le asignó como tratamiento estadístico RM. La Figura 4 muestra la localización aproximada de los puntos de medición de la densidad. Para este ejercicio se definieron 5 grupos o tratamientos: uno con mediciones tomadas sobre los sensores (Gauges), el segundo considerado densidad entre sensores (Between), un tercer grupo cerca de la línea centro del carril (CL), el cuarto para el espaldón (Shoulder) y el último considera los puntos restantes de medición observados en la Figura 4 (Middle).

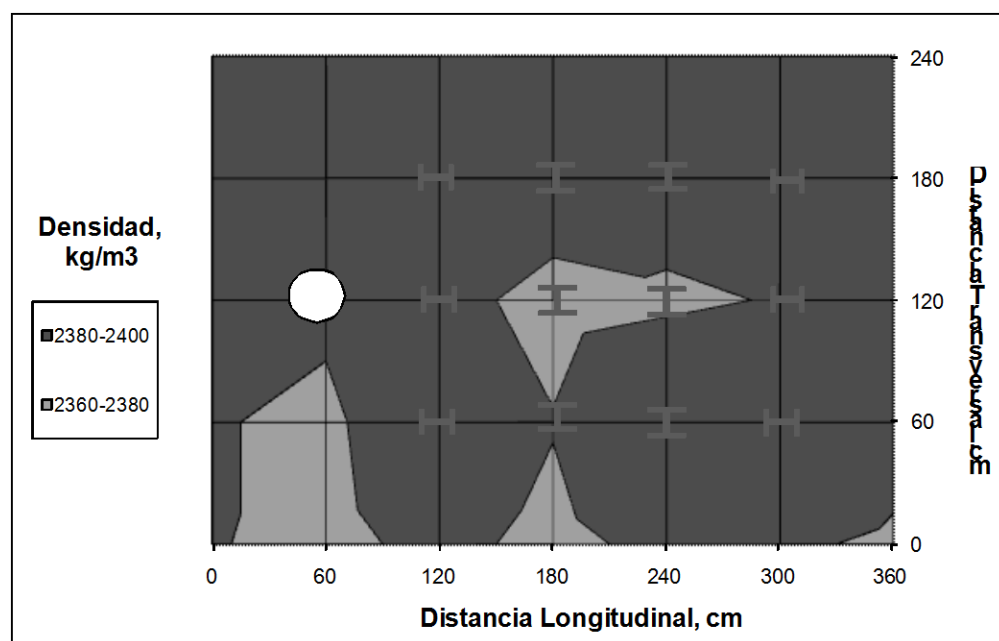


**Figura 4: Ubicación de los puntos de medición de densidad**

Los resultados de medición de densidad para la sección N10 indicaron que la densidad medida fue relativamente inferior en la zona donde se localiza el arreglo de sensores y sus alrededores. Esta tendencia fue más evidente cerca del espaldón como se observa en la Figura 5. El promedio en densidad medida para los puntos de aceptación (RM) fue de  $2386 \text{ kg/m}^3$  mientras que el resto de los grupos estuvieron en promedio por debajo de este valor en el orden de 0.04% a 0.27%. La Figura 6 también muestra como se distribuye la densidad a lo largo del tramo y como hacia el espaldón y en la zona cercana a la extracción del núcleo con mayor contenido de vacíos de aire coincide con la zona donde se obtuvo la menor densidad.

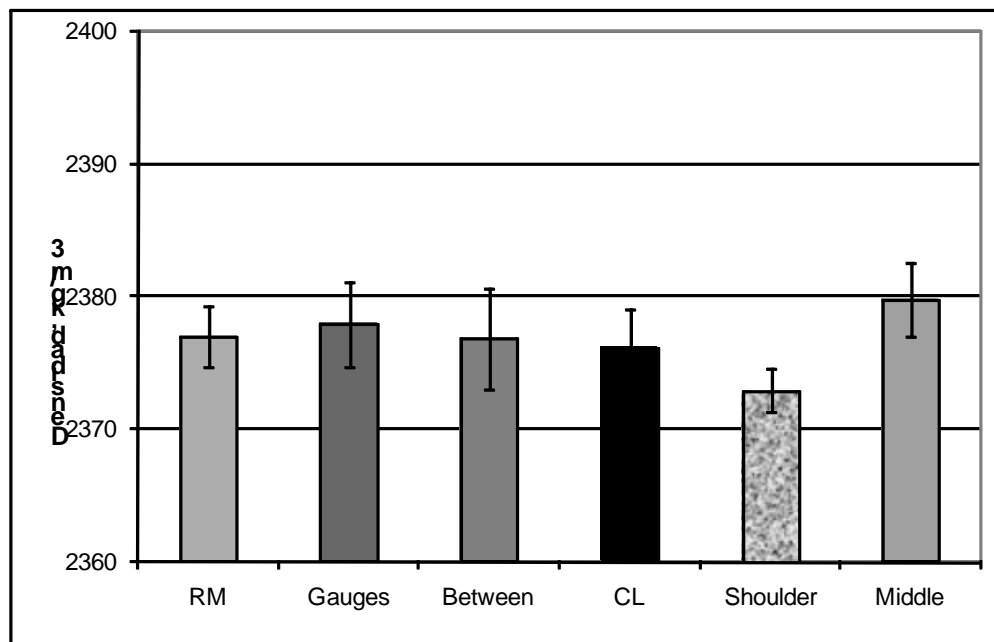


**Figura 5: Densidad por tratamiento para sección N10**

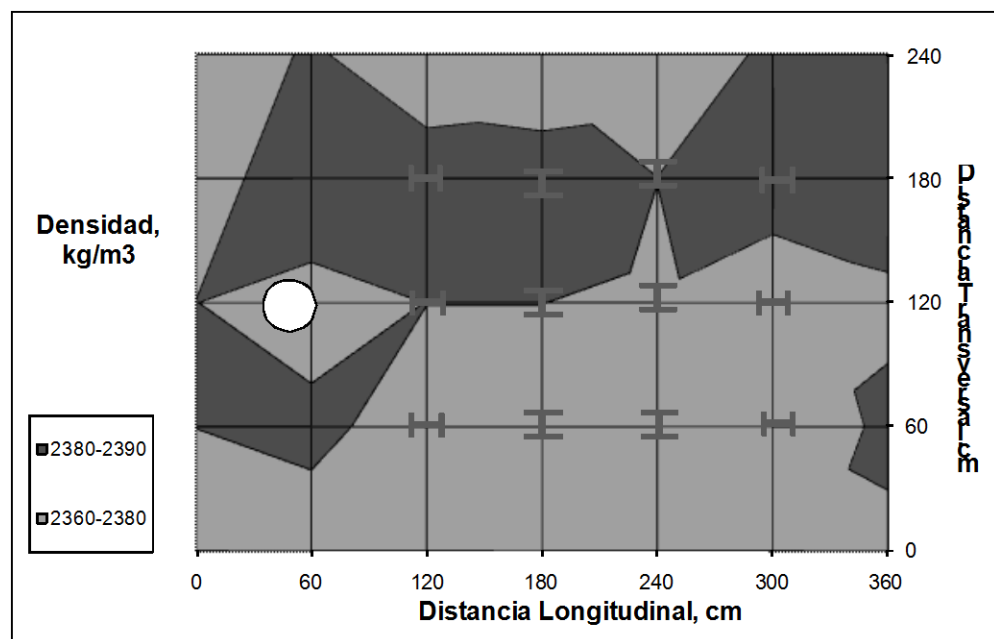


**Figura 6: Contorno de densidad para sección N10**

Los resultados de medición de densidad para la sección N11 indicaron que la densidad medida fue relativamente inferior en la zona del espaldón y hacia la línea centro del carril. Sin embargo, la densidad medida fue relativamente superior en las restantes zonas (Figura 7). El promedio en densidad medida para los puntos de aceptación (RM) fue de 2377 kg/m<sup>3</sup> mientras que el resto de los grupos fueron en promedio diferentes a este valor en el orden de 0.04% a 0.17%. La Figura 8 también muestra como se distribuye la densidad a lo largo del tramo y como hacia el espaldón y hacia el centro del carril es donde se obtuvo la menor densidad.



**Figura 7: Densidad por tratamiento para sección N11**



**Figura 8: Contorno de densidad para sección N11**

Mediante el uso del análisis de varianza (Tabla 2) se determinó que no existe evidencia estadística para un alfa de 5% para decir que los tratamientos definidos para densidad, por su ubicación, presentan diferencias significativas; por lo tanto las densidades medidas pueden ser iguales y se descarta el potencial efecto negativo de la instrumentación sobre la densidad de la capa asfáltica. Este mismo análisis de varianza indicó que ambas secciones presentan variabilidades relativamente similares observadas en el factor  $MS_{Error}$  el cual es un estimado de la varianza total para cada sección. Esto es importante dado que se esperaba obtener niveles de



compactación similares al estar las 2 secciones hechas exactamente del mismo material pero con tecnologías de producción diferentes (mezcla en caliente y mezcla tibia).

**TABLA 2: Análisis de varianza**

Sección	Fuente	DF	SS	MS	F	P-value
N10	Ubicación	5	1.00084	0.20017	2.24	0.064
	Error	52	4.64071	0.08924		
	Total	57	5.64155			
N11	Ubicación	5	0.8624	0.1725	1.36	0.256
	Error	52	6.6068	0.1271		
	Total	57	7.4691			

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados de este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones que se enmarcan dentro de los alcances de este proyecto:

- El análisis estadístico utilizado para comparar el contenido de vacíos de aire de muestras extraídas dentro y fuera de la zona de influencia del arreglo de sensores indicó que la presencia de estos sensores no involucró un efecto negativo en la calidad del material asfáltico colocado y compactado.
- El análisis de varianza utilizado para evaluar el potencial efecto de la densidad relativa medida con el equipo PQI indicó que no hay evidencia estadística para concluir que la presencia de los sensores afecte negativamente la calidad del material asfáltico colocado y compactado.
- En términos generales se determinó que la uniformidad de la capa asfáltica no fue comprometida por la presencia de la instrumentación.

## REFERENCIAS

Hugo, F., T. Scullion, N. Lee, K. Fults, and T. Visser. "A Rational Evaluation of Pavement Performance Using the Texas Mobile Load Simulator." Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington, 1997, Volume II, pp. 1125-1243.

Llenin, J.A, T.K. Pellinen, and D.M. Abraham. "Construction Management of a Small-Scale Accelerated Pavement Testing Facility." Journal of Performance of Constructed Facilities, Volume 20:3, August 2006, pp. 229-236.

Montgomery D. C., "Design and Analysis of Experiments". 7th ed., John Wiley & Sons, INC. July, 2008.

- Mulvaney, Ronald, Minnesota Department of Transportation; "MnROAD Mainline Rutting Forensic Investigation". Second International Conference on Accelerated Pavement Testing. Minneapolis, Minnesota. September 2004.
- Timm, D. H. "Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study". Draft report. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Ala., 2008.
- Timm, D. H., A. L. Priest, and T. V. McEwen. "Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track". Report No. 04-01. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Ala., 2004.
- Timm, D., "Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study". National Center for Asphalt Technology: NCAT Report 09-01, February 2009.
- Willis, R. and Timm D., "Repeatability of Asphalt Strain Measurements Under Falling Weight Deflectometer Loading". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2094, Washington, D.C., 2009.