

EVALUACION DEL AHUELLAMIENTO CON EQUIPO DE ALTO RENDIMIENTO

CRISTIAN CABRERA TORRICO, Ingeniero Civil

APSA Ltda. (cristiancabrera@apsa.cl)

ROBINSON LUCERO, Ingeniero Civil

Laboratorio Nacional de Vialidad, robinson.lucero@moptt.gov.cl

MOISES MOLINA LOPEZ – Estudiante memorista de Ingeniería Civil

Universidad de Chile momolina@cec.uchile.cl

RESUMEN

El ahuellamiento es uno de los deterioros típicos de los pavimentos asfálticos. La presencia de un ahuellamiento excesivo indica deficiencia estructural del pavimento, pero también, riesgo a la seguridad del usuario ya que, la acumulación de agua en su depresión, aumenta la probabilidad de ocurrencia de accidentes. A la fecha en Chile, el nivel de ahuellamiento se evalúa principalmente utilizando la regla AASHTO de 1,2 m de longitud. Aunque sus resultados son bastante confiables, el rendimiento de la medición es muy bajo y requiere de un buen control de tránsito.

De esta forma, este estudio tiene por objeto analizar el equipo de alto rendimiento para la estimación del ahuellamiento llamado “**Transverse Profile Logger (TPL)**”. El tema nace debido a la gran cantidad de los datos entregados por este equipo en comparación con el método manual (regla). Por ello, nace la necesidad de analizar los datos obtenidos y compararlos con las mediciones manuales con regla, con el fin de validar el equipo. El estudio se hará mediante un análisis gráfico y estadístico. Para ello, se dispone de varios tramos de distintas rutas con distintas condiciones de tránsito, tipo de estructura y nivel de ahuellamiento.

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes generales

Las características superficiales son una cualidad de todo pavimento y cada pavimento las presenta en distintos niveles, debido a la influencia del tránsito, métodos constructivos, entre otros. Una de las características superficiales que el usuario advierte cuando circula por una carretera es el perfil transversal, y como elemento de éste, se encuentra el ahuellamiento.

El Perfil Transversal corresponde al conjunto de elevaciones de la superficie de un camino en el sentido perpendicular a la circulación de los vehículos.

El Ahuellamiento corresponde a una deformación vertical permanente del pavimento asfáltico que se refleja en el perfil transversal y que se presenta como un surco longitudinal a lo largo del

camino bajo las huellas de rodado. Se produce por la acción de cargas debidas al tránsito, y esta deformación aumenta en el tiempo siendo cada vez mayor la profundidad. Geométricamente se define como la máxima depresión por huella en el sentido perpendicular al eje del camino tal como se aprecia en la Figura 1.1.

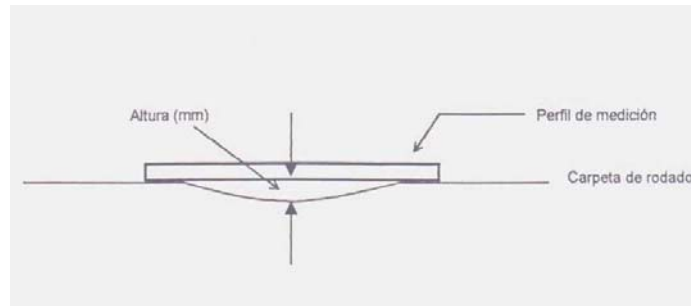


Figura 1.1. Ahuellamiento

La presencia del ahuellamiento en el pavimento afecta no sólo la condición estructural del pavimento (disminuye su vida útil), sino que también, en niveles extremos, afecta su condición funcional dificultando las condiciones de manejo y la seguridad de los usuarios, en especial, debido a que el ahuellamiento al ser una depresión en el pavimento, favorece la acumulación de agua en la superficie del camino pudiendo causar el fenómeno de hidroplaneo (deslizamiento sobre el agua) en condiciones de circulación bajo lluvia, lo que puede provocar un accidente. Debido a este potencial riesgo de accidente, las bases de licitación en el actual sistema de concesiones de carreteras exigen un control del ahuellamiento, cuyo valor máximo es de 15 mm.

Por otro lado, en Chile, a Diciembre de 2000, según fuente de la Dirección de Vialidad, existían 12508,58 kilómetros de caminos con pavimento flexible de los que gran parte corresponden a carreteras, las cuales son de varias decenas e incluso cientos de kilómetros. Evaluarlas con un método puntual o manual es un trabajo lento y caro, por lo que los equipos de medición manual también se denominan equipos de bajo rendimiento. En cambio, dado su gran rendimiento y sus bajos costos de operación, en comparación con los métodos manuales, los equipos de alto rendimiento presentan la ventaja de que son capaces de medir cientos de kilómetros por día en forma casi continua, lo que es muy superior al rendimiento de los métodos puntuales, determinando una mejor gestión. Además, los equipos de alto rendimiento tienen la ventaja adicional de dar una mayor seguridad vial, ya que suelen trabajar a velocidades compatibles con el tránsito, no requieren de control de tránsito y cerrar la pista de evaluación..

Sin embargo, estos equipos tienen una desventaja relativa en comparación con los métodos puntuales de medición, la cual es entregar una mayor cantidad de datos lo que implica una mayor dispersión con respecto a la uniformidad y representatividad de los datos entregados por los métodos puntuales (debido a la menor cantidad de datos).

Debido a esto, nace la necesidad de evaluar la “respuesta” entregada por los equipos de alto rendimiento, con el fin de validarlos.

1.2 Objetivos y alcances del tema

El objetivo específico y principal de este trabajo es la validación del TPL para la evaluación del nivel de ahuellamiento de los pavimentos asfálticos, para lo cual se realizó una comparación de los resultados obtenidos con el TPL con datos reales obtenidos de mediciones manuales. A partir de este análisis se determinó una correlación aceptable estadísticamente entre nivel de ahuellamiento promedio a partir de las mediciones del TPL y las mediciones manuales. Con el objetivo de tener una mejor estimación en términos promedio se incorporó un factor de corrección a los datos del TPL para ajustarlos con el ahuellamiento real en términos promedio.

1.3 Descripción de los equipos utilizados en este trabajo

- **Regla de 1,2 m.**

Debido a la forma directa en que mide el ahuellamiento y su fácil utilización, el método puntual tradicional y más usado para medir ahuellamiento es la regla AASHTO de 1,2 m (Figura 1.2). Todos los registros manuales de regla de 1,2 m de medición de ahuellamiento de que se disponen para este trabajo, se han medido por este método. Además, se dispone de este equipo para la realización de nuevas mediciones.



Figura 1.2. Regla AASHTO de 1,2 m.

- **Transverse profile logger (TPL)**

El TPL, es un equipo compuesto por seis unidades UMSA (Ultrasonic Measurement Sensors Array) cada una con cinco sensores, un controlador maestro y una barra portadora. En total son treinta sensores de ultrasonido individuales espaciados a 100 mm y que tienen por objetivo la obtención del perfil transversal aproximado de la vía desde un vehículo en movimiento para realizar la gestión del pavimento en estudio. El sistema es capaz de trabajar en configuraciones de 2,0 , 2,5 y 3,0 m de ancho. En la Figura 1.3, se aprecia al TPL en su configuración de 3,0 m.



Figura 1.3. Transverse Profile Logger (TPL)

Su operación se realiza en conjunto con el sistema de posicionamiento kilométrico y velocidad, permitiendo a la persona que lo está utilizando, definir los intervalos de muestreo para el registro de los perfiles transversales, los cuales son almacenados en el control maestro. Este tiene 2 MB de memoria RAM y cada muestra de datos ocupa 64 caracteres, lo que permite almacenar 32.768 muestras antes de tener que descargar los datos del TPL. Luego estos datos son procesados en un computador para su posterior análisis. Este equipo permite registrar el perfil transversal estimado cada 5,0 m y por ende estimar el ahuellamiento.

Dada su condición de equipo de ultrasonido, el TPL tarda 0,12 segundos en tomar las medidas de todos los sensores y otros 0,12 segundos en almacenarlas.

Antes de realizar una medición, se debe calibrar los sensores en cero y corregir la no perfecta horizontalidad de la barra. La forma de calibrar y corregir es la siguiente:

- Primero se instala el vehículo con el equipo estacionado sobre una superficie cubierta con agua y a la que no llegue viento, lo que garantiza la horizontalidad de la superficie.
- Se mide manualmente la distancia que hay de un sensor a la superficie del agua con una regla para distintas distancias, recomendándose iniciar a una distancia de 250 mm para luego mover de 25 mm cada vez hasta llegar a 500 mm. Cada vez se hace una medición del sensor con el TPL. Este procedimiento sirve para corregir a los sensores. Este factor corresponde al promedio de los cuocientes entre la distancia medida con el sensor y la medida con la regla. Se hace con uno sólo ya que se supone que todos los sensores son iguales.
- Luego, se procede a realizar mediciones sin mover el equipo, o sea, en forma estática, con lo cual se obtiene varias veces el registro estimado del mismo perfil. Se corrige las elevaciones obtenidas por el factor obtenido en el punto anterior.
- Se desarrolla una ecuación de regresión lineal: **DISTANCIA = A + B*ELEVACION**, en que DISTANCIA es la distancia medida en mm, y ELEVACION corresponde a la elevación corregida del punto anterior. Con esto se obtienen las constantes de regresión A y B.

- No se corrige por humedad, temperatura, altitud ni presión barométrica, ya que el TPL tiene un sensor patrón que mide permanentemente a un punto fijo. Cuando este sufre algún cambio en su medición, es porque ha habido cambios en las condiciones atmosféricas y el TPL corrige automáticamente los datos cuando ocurre esta situación.

1.4 Algoritmos de estimación del ahuellamiento

Los algoritmos de estimación del ahuellamiento corresponden a simulaciones realizadas por computador, de algún método puntual o real de medición del ahuellamiento.

El TPL tiene como algoritmo de simulación principal al método **“straight-edge”**, o sea, el método de la regla. Este método simula una regla graduada de largo variable que permite variar desde 1,2 m hasta 3,0 m. En la Figura 1.4, se aprecia el método de simulación **“straight-edge”** para el TPL.

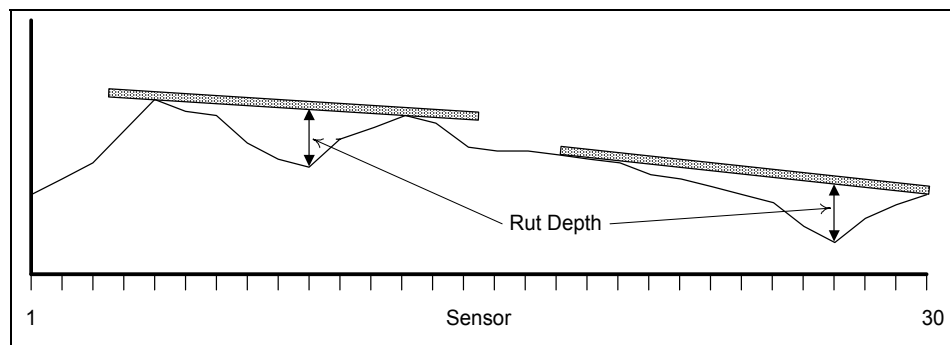


Figura 1.4 Método de Simulación “Straight-Edge”

El otro algoritmo de estimación del ahuellamiento es el denominado **“pseudo-rut”**, cuya forma de aplicación se presenta gráficamente en la Figura 1.5. Este método se utiliza normalmente cuando se tiene la barra retraída y no se puede aplicar el procedimiento anterior. En el estudio no fue considerado el uso del este método.

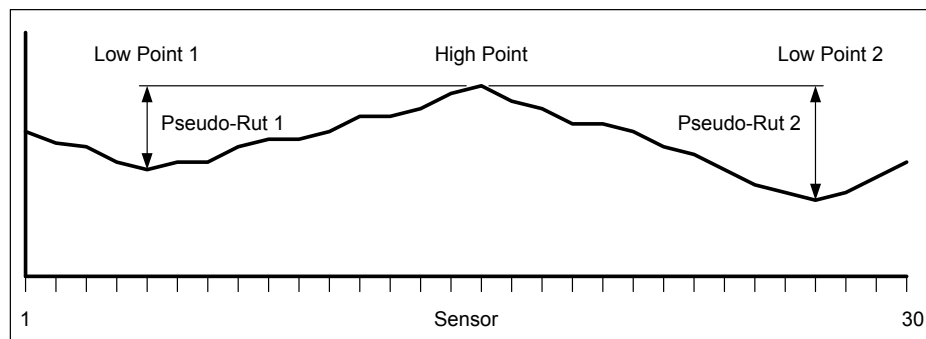


Figura 1.5 Definición del algoritmo “pseudo-rut”.

1.5 Tramos de prueba seleccionados

Los tramos de prueba elegidos corresponden a caminos, carreteras y autopistas con distintas características de estructura de pavimento, edad del pavimento, solicitud y nivel de tránsito y ubicación geográfica y condición climática, lo que garantiza la mayor representatividad posible de los caminos construidos con pavimento asfáltico en Chile. Los tramos elegidos corresponden a mediciones realizadas con el TPL durante los años 2001 y 2002. Los tramos presentados en este informe corresponde a pavimentos de mezclas asfálticas densas tradicionales.

2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

2.1 Teoría de análisis estadístico y calibración de modelos

El modelo que mejor se ajusta al análisis que se pretende hacer, es el modelo que compara el valor predicho y el valor observado. Este es el llamado modelo de predicción y generalmente se utiliza para comparar los valores que entrega un programa o alguna ecuación de diseño de algo real en contra de los valores reales observados o medidos en terreno.

En este estudio, el valor observado corresponderá al ahuellamiento medido con regla de 1,2 m y el valor predicho corresponderá al ahuellamiento estimado con el equipo de alto rendimiento. En este caso ambos valores son conocidos por lo que si los valores predicho y observado son parecidos, el equipo de alto rendimiento es bueno para estimar el nivel de ahuellamiento. En caso contrario, es necesario determinar si existe una correlación aceptable y aplicar un factor de ajuste a los datos.

La metodología de calibración que se seguirá será mediante un análisis de regresión lineal simple, en donde existe una sola variable independiente x que representa los valores predichos y que será el conjunto de mediciones realizadas con el TPL y una sola variable aleatoria dependiente y que representa los valores observados y que corresponderá al conjunto de mediciones hechas con regla de 1,2 m.

2.2 Método de mínimos cuadrados

Se tiene el caso de una regresión lineal simple en que se considera un solo regresor o valor predicho que es x y una variable dependiente o respuesta que es y (valor observado). Supóngase que la verdadera relación entre y y x es una línea recta y que el valor observado y es una variable aleatoria en cada nivel x . El valor esperado de y para cada valor de x es:

$$E(y / x) = a + bx$$

donde a es la ordenada al origen y b la pendiente y ambos son los coeficientes de regresión desconocidos. Se supone que cada observación y puede describirse por el modelo:

$$y = a + bx + e$$

donde e es un error aleatorio con media cero y varianza σ^2 y recibe el nombre de **residuo**. También se supone que los errores aleatorios que corresponden a observaciones diferentes son variables aleatorias no correlacionadas. Supóngase que se tienen n pares de observaciones $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. Las estimaciones de a y b deben dar como resultado una línea que se ajuste lo mejor posible a los datos.

El criterio para estimar los coeficientes de regresión en que se minimiza la suma de los cuadrados de las desviaciones verticales, se conoce como **método de mínimos cuadrados**. El modelo expresando las n observaciones de la muestra queda:

$$y_i = a + bx_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

y la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a la recta de regresión es:

$$L = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

Los estimadores de mínimos cuadrados de a y b , deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial L}{\partial a} \Big|_{a,b} = -2 \left(\sum_{i=1}^n y_i - a - bx_i \right) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} \Big|_{a,b} = -2 \left(\sum_{i=1}^n y_i x_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) = 0$$

Finalmente, luego de ordenar y simplificar las expresiones anteriores y despejando los estimadores de mínimos cuadrados de las ecuaciones, se obtiene:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

2.3 Test de hipótesis sobre la media

Una parte importante al evaluar un modelo de regresión lineal, es la prueba de hipótesis estadísticas sobre los parámetros del modelo. Para probar hipótesis sobre la pendiente y la ordenada al origen del modelo de regresión, debe hacerse la hipótesis adicional de que el componente de error en el modelo, e , tiene una distribución normal con media cero y varianza σ^2 .

La estructura de la prueba de hipótesis se formula utilizando el término “hipótesis nula”. Este se refiere a cualquier hipótesis que se desee probar y se representa por H_0 . El rechazo de H_0 da como resultado la aceptación de la “hipótesis alternativa”, representada por H_1 . Una hipótesis nula referente a un parámetro poblacional será establecida de forma tal que especifique un valor exacto del parámetro (por ejemplo, media igual a cero), mientras que la hipótesis alternativa H_1 admite la posibilidad de varios valores (por ejemplo, media distinta de cero). Esto es,

$$\begin{array}{ll} \text{si} & H_0: \mu = 0 \\ \text{entonces} & H_1: \mu \neq 0 \end{array}$$

En teoría de hipótesis existen dos errores básicos, que han sido representados en la Tabla 2.1. La probabilidad de cometer un error tipo I (rechazo de la hipótesis nula cuando ésta en realidad es verdadera), también se conoce como nivel de significancia y se representa por α . La probabilidad de cometer un error tipo II (aceptación de la hipótesis nula cuando ésta en realidad es falsa), representada por β , es imposible de calcular a no ser que se tenga una hipótesis alternativa específica (que H_1 sea un valor fijo).

Tabla 2.1 Decisiones en la Prueba de Hipótesis

	Ho es Verdadera	Ho es Falsa
Se acepta Ho	No Hay Error	Error Tipo II
Se rechaza Ho	Error Tipo I	No Hay Error

Dada la gran cantidad de datos se supone válida la normalidad de la variable e . Posteriormente se debe verificar que la diferencia entre el valor real y el valor predicho sea en promedio nula, o sea, $\mu = 0$, con lo que se comprobaría que la regresión es correcta.

El test de hipótesis más apropiado para este caso es el “**test sobre medias para distribuciones normales con varianza desconocida**”.

Las hipótesis son:

$$\begin{array}{ll} H_0: & \mu = 0 \\ H_1: & \mu \neq 0 \end{array}$$

El rechazo de H_0 en un nivel de significancia α resulta cuando el estadístico t , excede a $t_{\alpha/2, n-1}$ o es menor a $-t_{\alpha/2, n-1}$.

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n-1}}$$

con,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

en que t es una Student a $n-1$ grados de libertad.

2.4 Comparación entre las mediciones manuales con el TPL

Este estudio contempla sólo pavimentos asfálticos con carpeta de rodado construida mezclas densas tradicionales, por lo que pavimentos de doble tratamiento asfáltico, mezclas abiertas y otros están siendo analizados de forma independiente..

Como consecuencia de un análisis exhaustivo de los datos, se decidió realizar un análisis promedio de los pares de datos de cada tramo con el fin de disminuir la dispersión. Se eliminaron los datos que estaban fuera del nivel de confianza de 95%.

A continuación se muestra la comparación gráfica realizada para cada uno de los tramos analizados:

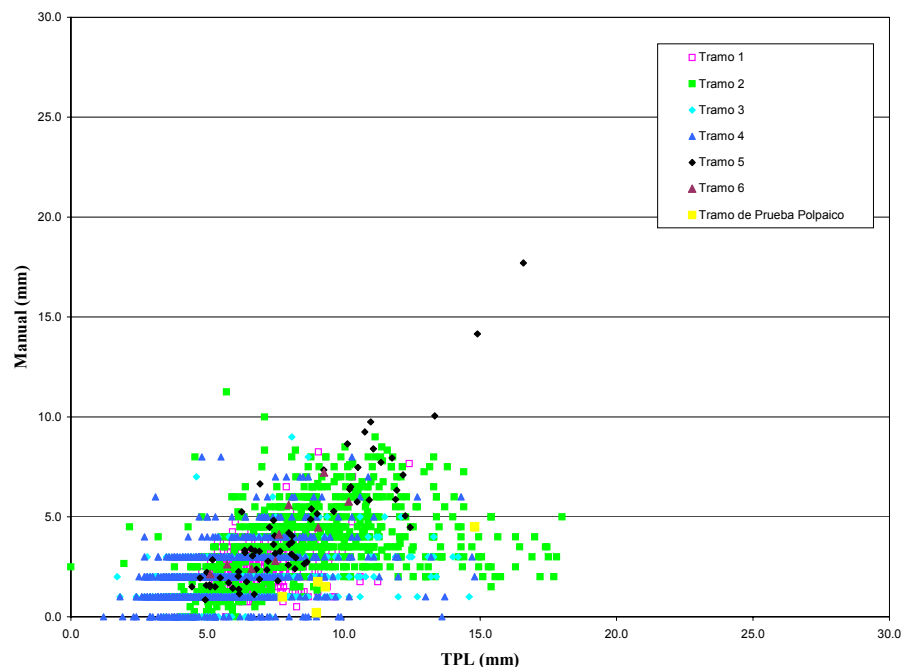


Figura 6 Ahuellamiento Máximo Manual vs TPL. Promedio cada 200 m.

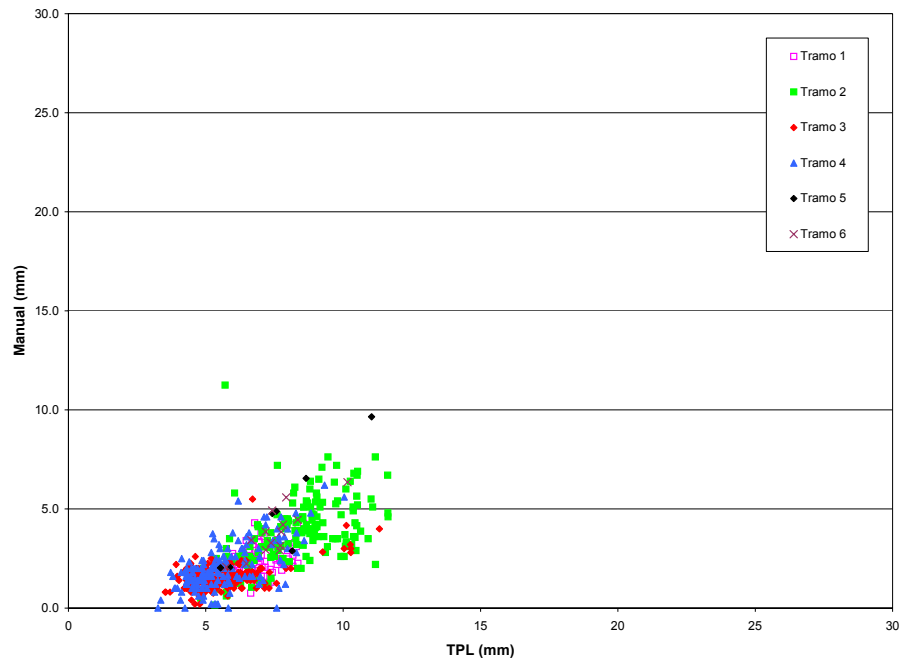


Figura 7 Ahuellamiento Máximo Manual vs TPL. Promedio cada 1000 m.

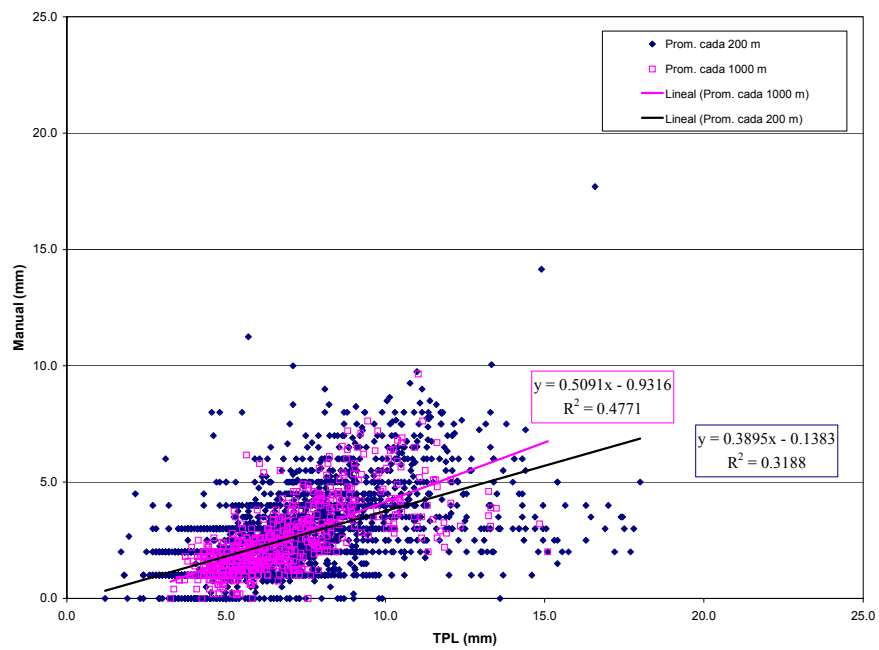


Figura 8 Líneas de tendencia para promedios cada 200 y 1000 m.

2.5 Análisis estadístico de los resultados y calibración.

A continuación se entrega en detalle el análisis de regresión lineal utilizando la herramientas estadísticas del programa Microsoft Excel. Los coeficientes a y b corresponden al intercepto y pendiente respectivamente:

Tabla 2 Resumen de la Regresión. Promedio cada 200 m

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coeficiente de correlación múltiple	0.564655553				
Coeficiente de determinación R ²	0.318835894				
R ² ajustado	0.31860808				
Error típico	1.39373855				
Observaciones	2992				
<i>Análisis de Varianza</i>					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	<i>F</i>	Valor crítico de F
Regresión	1	2718.62475	2718.6247	1399.5443	1.33E-251
Residuos	2990	5808.09636	1.9425071		
Total	2991	8526.72111			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>			
Intercepto	-0.13829612	0.07437182			
Pendiente	0.389473364	0.01041081			

Tabla 3 Resumen de la Regresión. Promedio cada 1000 m

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coeficiente de correlación múltiple	0.690758712				
Coeficiente de determinación R ²	0.477147599				
R ² ajustado	0.476302926				
Error típico	1.072675186				
Observaciones	621				
<i>Análisis de Varianza</i>					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	<i>F</i>	Valor crítico de F
Regresión	1	649.981137	649.98114	564.89052	3.193E-89
Residuos	619	712.241242	1.1506321		
Total	620	1362.22238			
		<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>		
Intercepto		-0.93162015	0.15061705		
Pendiente		0.509144316	0.02142194		

Corrigiendo por los coeficientes de regresión, se obtiene el siguiente gráfico:

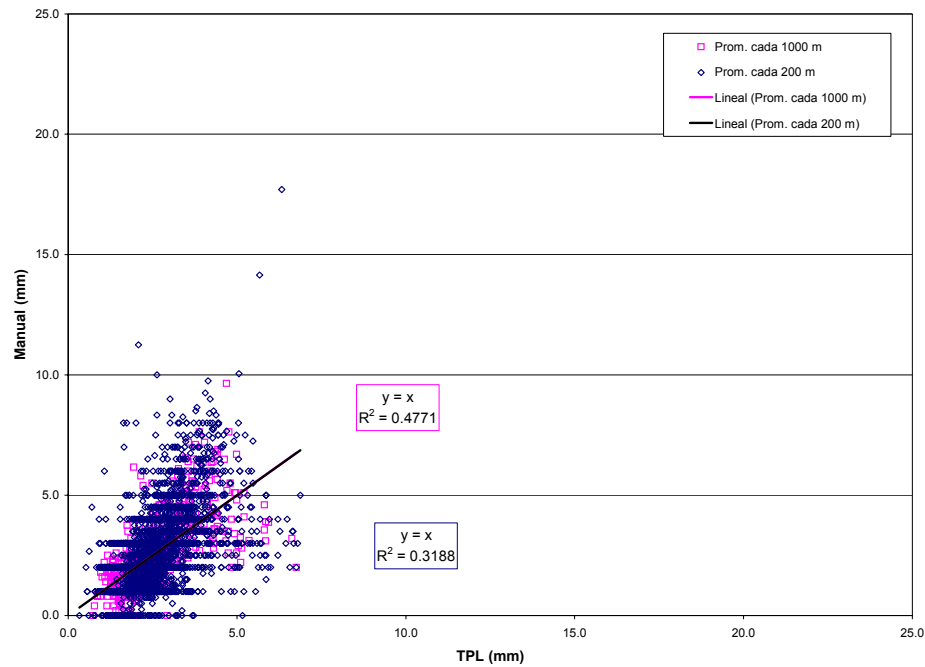


Figura 9 Ahuellamiento Máximo Manual vs TPL corregido.

Dada la regresión se debe verificar que ambas medias sean estadísticamente iguales. A continuación se entrega el resultado del “test t” aplicado para los promedios cada 200 m y 1000 m respectivamente:

Tabla 4 Prueba t para medias de dos muestras emparejadas. Promedio cada 200 m

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	2.4756058	2.4756058
Varianza	2.8507927	0.9089351
Observaciones	2992	2992
Coeficiente de correlación de Pearson	0.5646556	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2991	
Estadístico t	-1.45E-13	
P(T<=t) una cola	0.5	
Valor crítico de t (una cola)	1.6453623	
P(T<=t) dos colas	1	
Valor crítico de t (dos colas)	1.9607569	

Tabla 5 Prueba t para medias de dos muestras emparejadas. Promedio cada 1000 m

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	2.498854	2.498854
Varianza	2.1971329	1.0483567
Observaciones	621	621
Coeficiente de correlación de Pearson	0.6907587	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	620	
Estadístico t	3.683E-15	
P(T<=t) una cola	0.5	
Valor crítico de t (una cola)	1.6473155	
P(T<=t) dos colas	1	
Valor crítico de t (dos colas)	1.9637991	

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis estadístico se obtuvieron las siguientes relaciones para estimar el ahuellamiento medido por la regla de 1.2 m:

Promedio cada 200 m: **Manual = -0.13829612 + 0.389473364*TPL**
 $-t_{\alpha/2, n-1} = -1.9607569 < t = -1.45E-13 < t_{\alpha/2, n-1} = 1.9607569$

Promedio cada 1000 m: **Manual = -0.93162015 + 0.509144316*TPL**
 $-t_{\alpha/2, n-1} = -1.9637991 < t = 3.683E-15 < t_{\alpha/2, n-1} = 1.9637991$

De los resultados del test-t de Student, se aprecia que el estadístico t se encuentra en ambos casos, promedios cada 200 y 1000 m, dentro de la región de aprobación, por lo que se acepta la hipótesis de que las medias son estadísticamente iguales.

La dispersión que se aprecia en el gráfico corregido y que se ve reflejada en el valor del coeficiente R², se puede explicar por el hecho que el vehículo de auscultación que transporta al TPL nunca avanza en una dirección perfectamente recta por la vía, lo que provoca desplazamientos laterales del vehículo que implica que sea muy difícil medir el mismo punto que se midió manualmente, tanto en el sentido transversal con longitudinal. Por ello es que no se hizo un análisis punto a punto sino en términos promedio. Vale notar que los resultados obtenidos para la correlación coinciden con ensayos realizados en Nueva Zelanda, donde se realizó una prueba de armonización entre equipos de alto rendimiento (incluyendo el TPL y otros de tipo láser) y mediciones manuales de ahuellamiento (Bennet y Wang 2002).

El análisis contempló promedios de 200 y 1000 m. Esto se explica debido a que pueden ser utilizadas ambas relaciones para tramos a medir de distintas longitudes, ya que pueden ser medidos desde unos cientos de metros de un camino hasta una red vial de cientos de kilómetros.

Finalmente, se puede concluir que el equipo de alto rendimiento TPL entrega, en promedio, una buena estimación del nivel de ahuellamiento del camino en pavimentos asfálticos con carpeta de rodado construida con mezclas densas tradicionales. De esta forma es posible utilizar el equipo TPL para estimar en términos promedio los valores de ahuellamiento medidos con regla de 1.2 m.

Dado que este equipo es capaz de medir cientos de kilómetros por día y tiene un bajo costo de operación en comparación con el método manual, se tiene una herramienta útil para mejorar la gestión y estimar en menor tiempo el ahuellamiento de la red vial. Además, posee la ventaja adicional de dar una mayor seguridad vial ya que trabaja a velocidades compatibles con el tránsito y no requiere de señalizaciones estáticas.

4. REFERENCIAS

- Bennet, C. R., (1996), Technical Evaluation of Romdas Ultrasonic Measurement System, Technical Memo 1. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (1996), Accuracy of Romdas Ultrasonic Measurement System. Technical Memo 2. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (1996), Contact Area of Romdas Ultrasonic Measurement System. Technical Memo 3. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (1996), Effects of Temperature and Humidity on Romdas Ultrasonic Measurement System. Technical Memo 4. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (1996), Analysis of Transverse Profile Measurements from the Romdas Ultrasonic Measurement System. Technical Memo 5. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (1997), Further Testing of Romdas Transverse Profile Logger: Dynamic Testing in New Zealand. Technical Memo. Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., (2000) Validation of Romdas Transverse Profile Logger, HTC Infrastructure Management Ltd., Nueva Zelanda.
- Bennet, C. R., Wang, H., (2002) Harmonisation of Automated Rut Depth Measurements, Transfund New Zealand Research Report. Reporte Preliminar.
- Highway and Traffic Consultants Ltd. (2000), Romdas Road Measurement Data Acquisition System, User's Guide.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., (1996) Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw Hill. México.

- Schmidt, B., Wambold, J., Kawamura, A., y Descornet, G (1998) Piarc International Experiment to Harmonise Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedures, World Road Association. Francia. Reporte Preliminar.
- Simpson, A. L., (2001) Characterization of Transverse Profiles, Federal Highway Administration U. S. Department of Transportation, Final Report.