

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Los deterioros o fallas que sufren los pavimentos son causados por distintos motivos, entre ellos: malos procesos constructivos, incremento de las cargas de tránsito y la influencia de las condiciones ambientales. Estos factores acortan la vida útil de los pavimentos generando costos en su mantenimiento y aumentan los tiempos de recorrido de los usuarios.

El ahuellamiento es uno de los deterioros típicos de los pavimentos asfálticos, el cual es una deformación permanente que se manifiesta superficialmente, como consecuencia de la aplicación reiterada de las cargas del tránsito. Consiste en la acumulación de la deformación vertical permanente que se produce en todas las capas que forman la estructura del camino evidenciada en correspondencia con la huella de circulación del tránsito, reduciendo la vida en servicio del pavimento y originando riesgos en la circulación de los usuarios.

El avance de la tecnología en el mundo está permitiendo nuevas alternativas para el análisis de pavimentos, una de estas novedades es el empleo de la tomografía computarizada de rayos-x (TC-RX), debido a que ofrece ventajas relacionadas con: su carácter de ensayo no destructivo, la rapidez de los ensayos, la facilidad de uso y la confiabilidad de los resultados.

La TC-RX se basa en la utilización de rayos-x para la obtención de imágenes digitalizadas que corresponden a secciones transversales de las piezas estudiadas por esta técnica, a través del análisis de estas imágenes se podrá evaluar el efecto que produce el ahuellamiento en la estructura interna del pavimento flexible, con respecto a la determinación de la cantidad de puntos de contacto entre las partículas de agregado y el porcentaje de vacíos presentes en las muestras de núcleos de capa asfáltica.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

El ahuellamiento se puede originar debido a varias razones: propiedades deficientes de los materiales que componen el paquete estructural, propiedades volumétricas erróneas, por las sollicitaciones sobre la estructura debidas al tránsito y las condiciones climáticas (altas temperaturas, cargas pesadas, bajas velocidades de circulación).

La medición del ahuellamiento en pavimentos flexibles se la realiza generalmente por el método manual utilizando la regla AASHTO de 1.2 m de longitud, por su fácil utilización y por la manera directa en la medición. Esta evaluación es superficial y mide la depresión generada en el pavimento a causa del ahuellamiento.

El poder tener a disponibilidad la herramienta del tomógrafo de rayos x para su utilización en el campo de la ingeniería de pavimentos, representa un gran avance en los métodos de evaluación de pavimentos, permitiéndonos realizar el análisis de su estructura interna, logrando con esto conocer el efecto que causa el ahuellamiento en los componentes de la capa asfáltica, ya sea en el trabajo agregado-agregado como en el porcentaje de los vacíos; parámetros que son importantes en el comportamiento que tendrá el pavimento.

La implementación de esta técnica novedosa que está marcando tendencia en el ámbito de los pavimentos por brindar rapidez en los ensayos, facilidad en su ejecución y confiabilidad en los resultados, tiene un gran potencial en el sentido de que brinda la posibilidad de observar lo que pasa realmente en el interior de la capa asfáltica afectada por el ahuellamiento, consiguiendo de esta manera poder visualizar y analizar el comportamiento de las partículas de agregados y los vacíos.

Comprender y analizar los efectos que produce el ahuellamiento en los pavimentos flexibles de la zona de Tarija a través de esta técnica de imágenes computarizadas, coadyuvaría al mejor entendimiento de este fenómeno y consecuentemente al mejoramiento de los diseños de las mezclas asfálticas para tener vías que cumplan con los requisitos de seguridad y confortabilidad a los usuarios que las transiten.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1. Situación problemática**

La infraestructura vial proporciona una base esencial para el funcionamiento de todas las economías nacionales y genera una amplia gama de beneficios económicos y sociales. Por lo tanto, conservar adecuadamente la infraestructura vial es imprescindible para preservar y aumentar estos beneficios.

Dentro de esta infraestructura vial se encuentran los pavimentos flexibles, que son un pavimento elaborado por una capa asfáltica aplicada sobre una capa de base y una capa de sub-base, sus ventajas frente al pavimento rígido son sus menores costes iniciales de construcción y su puesta en servicio de la superficie asfaltada de manera inmediata; esto se contrarresta al presentar mayores deformaciones, mayor coste de mantenimiento y menor vida útil.

Una de las principales causantes que generan el deterioro en los pavimentos flexibles durante su vida útil es el aumento progresivo de las solicitaciones del tráfico, esto representa el aumento de las cargas de los vehículos, en especial del sector de transporte pesado que transporta mayores cantidades de carga que aceleran los daños en los pavimentos.

Entre estos daños o fallas que reducen la vida útil de los pavimentos flexibles se encuentra el ahuellamiento que es una deformación permanente y consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos que se desarrolla gradualmente hasta que llega el punto en el que dificulta la maniobrabilidad de los vehículos generando malestar a los usuarios e inseguridad.

Por lo tanto, es necesario evaluar el fenómeno de ahuellamiento mediante las tomografías computarizadas de rayos-x para realizar un análisis de la estructura interna de las capas asfálticas y observar que efectos o daños produce el ahuellamiento. Esta tecnología usualmente es utilizada en el ámbito médico y en los últimos años se está aplicando al área de la ingeniería de pavimentos.

Con el presente proyecto se pretende difundir esta técnica de imágenes computarizadas obtenidas a partir de rayos-x como un método nuevo para evaluar el ahuellamiento en carpetas asfálticas de pavimentos flexibles desde otra perspectiva diferente a las convencionales.

### **1.3.2. Problema**

¿Es posible realizar la evaluación del ahuellamiento en pavimentos flexibles mediante la metodología de tomografía computarizada de rayos-x, lo cual permitirá analizar qué efectos produce este fenómeno en el interior de la capa asfáltica?

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la evaluación del fenómeno del ahuellamiento en pavimentos flexibles en servicio de la ciudad de Tarija mediante la aplicación de tomografía computarizada de rayos-x, para analizar los efectos que produce en la estructura interna de la capa asfáltica.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar las propiedades de los pavimentos, los daños a los que son susceptibles durante su vida útil, profundizando en el fenómeno del ahuellamiento.
- Definir la ubicación de los tramos de pavimentos en servicio de la ciudad de Tarija para evaluar el ahuellamiento.
- Extraer núcleos de los tramos de pavimentos seleccionados para realizar tomografía computarizada de rayos-x.
- Realizar el análisis de las imágenes obtenidas por medio de la tomografía de rayos-x de la estructura interna de los núcleos asfálticos con algoritmos computacionales.
- Determinar si existe relación entre el porcentaje de vacíos y el número de puntos de contacto agregado-agregado en las imágenes de ahuellamiento en pavimentos flexibles.
- Establecer conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos del análisis de imágenes de tomografía computarizada de rayos-x a los núcleos de pavimento extraídos.

### **1.4.3. Hipótesis**

Si se realiza la evaluación del ahuellamiento en capas asfálticas de pavimentos flexibles con la aplicación de la metodología de tomografía computarizada de rayos-x (TC-RX), entonces se podrá obtener las características reales de los efectos producidos por el ahuellamiento en la estructura interna de la mezcla del pavimento a partir del análisis de imágenes mediante algoritmos computacionales.

### **1.4.4. Definición de variables independientes y dependientes**

#### **1.4.4.1. Variables independientes**

- **Pavimentos flexibles:** Son pavimentos formados por capas de resistencia decreciente con la profundidad sobre los cuales transitan vehículos livianos y pesados en forma continua, lo que puede producir ahuellamiento en los carriles de circulación ocasionando una mala calidad de la vía y la reducción de su vida útil.

#### **1.4.4.2. Variables dependientes**

- **Ahuellamiento:** Daño típico que se produce en pavimentos flexibles, caracterizado por la deformación transversal a la vía evidenciada en correspondencia con la huella de circulación del tránsito, con apoyo de la tomografía computarizada de rayos-x evaluaremos el comportamiento de los vacíos y del contacto agregado-agregado en la capa asfáltica del pavimento.

### 1.4.4.3. Operacionalización de variables

Variable		Concepto	Medición	Unidad
<b>Dependiente</b>	Ahuellamiento	<p>Daño producido en pavimentos flexibles a causa del continuo tránsito de vehículos pesados que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Las propiedades del pavimento afectado por el ahuellamiento se analizarán a partir de tomografías computarizadas de rayos-x para obtener imágenes del interior de las capas asfálticas.</p>	Tomografías computarizadas de rayos-x	Algoritmos computacionales
			Peso volumétrico	g/cm <sup>3</sup>
			Altura de núcleos asfálticos	cm
			Porcentaje de vacíos	%
			Contacto agregado-agregado	Puntos de contacto
<b>Independiente</b>	Pavimentos flexibles	<p>Son los pavimentos contruidos con capas de mezcla asfáltica. La superficie se apoya sobre una o más capas que ayudan a soportar las cargas. Proporcionan una superficie de rodadura muy confortable para el usuario.</p>	Capas del pavimento	cm

**Fuente:** Elaboración propia

## **1.5. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.5.1. Unidad de estudio**

La unidad de estudio del proyecto serán los pavimentos flexibles, de donde se extraerán los núcleos asfálticos de las zonas en que estos presenten ahuellamiento, este fenómeno se produce debido al continuo tránsito de vehículos y se caracteriza por la aparición de una deformación en la superficie del pavimento en el sentido de las huellas de circulación de los vehículos.

### **1.5.2. Población**

Los deterioros en los pavimentos flexibles son considerados como la población del proyecto, los deterioros ocasionan que los pavimentos no presenten condiciones óptimas para la circulación de los vehículos ocasionando malestar e inseguridad a los usuarios y generan considerables costos de mantenimiento. Las modalidades de falla dentro de las cuales se agrupan los distintos tipos de deterioro son: Las deformaciones superficiales, fisuraciones o agrietamientos, desintegraciones y otros.

### **1.5.3. Muestra**

De todos los tipos de deterioros que se presentan en los pavimentos flexibles el que interesa para el proyecto y al cual este estará direccionado a identificar en zonas de pavimentos en servicio de la ciudad de Tarija es al fenómeno de ahuellamiento, extrayendo muestras de núcleos de la capa asfáltica para su posterior evaluación mediante tomografía computarizada de rayos-x con la finalidad de conocer los efectos que causa en el comportamiento de vacíos y el contacto agregado-agregado.

### **1.5.4. Muestreo**

El muestreo se realizará en tres tramos de pavimento flexible de la ciudad de Tarija que presentan deterioro por ahuellamiento en su superficie de rodadura, el número de puntos de muestreo de núcleos de capa asfáltica localizados en estos tramos serán en total 18 puntos, en cada punto definido se procederá a extraer 2 muestras; es decir una muestra en

cada huella de circulación. Por lo tanto, el número total de muestras de núcleos asfálticos extraídos de los pavimentos afectados por ahuellamiento serán 36.

Adicionalmente para poder realizar una comparación de los efectos producidos por el ahuellamiento con núcleos asfálticos de los mismos tramos que no presentan este daño, se extraerán 16 muestras de núcleos en total de capa asfáltica sin daño por ahuellamiento.

La ubicación de los puntos de muestreo se detallará a continuación:

**Tramo N°1:**

**Av. Panamericana (Puente de San Jorge II – Ingreso a la nueva terminal de buses)**

**Figura 1.1: Localización satelital av. Panamericana (Puente de San Jorge II - Ingreso a la nueva terminal de buses)**



**Fuente:** Google Earth

Sobre este tramo se localizan 8 puntos de muestreos:

- Punto 1: Se localiza al inicio del tramo, en este punto se encuentra el ingreso a Importadora las Lomas.
- Punto 2: Se localiza pasando la rotonda.
- Punto 3: Se localiza cerca del ingreso al barrio Torrecillas.
- Punto 4: Se localiza en el ingreso a Importadora Campero.
- Punto 5, 6, 7 y 8: Se localizan en la parte final del tramo, donde existe un rompemuelleres, el ahuellamiento se presenta en toda la cuadra.

**Tramo N°2:**

**Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela del colegio Fe y Alegría)**

**Figura 1.2: Localización satelital av. Panamericana (Hotel Los Ceibos - Pasarela del colegio Fe y Alegría)**



Fuente: Google Earth

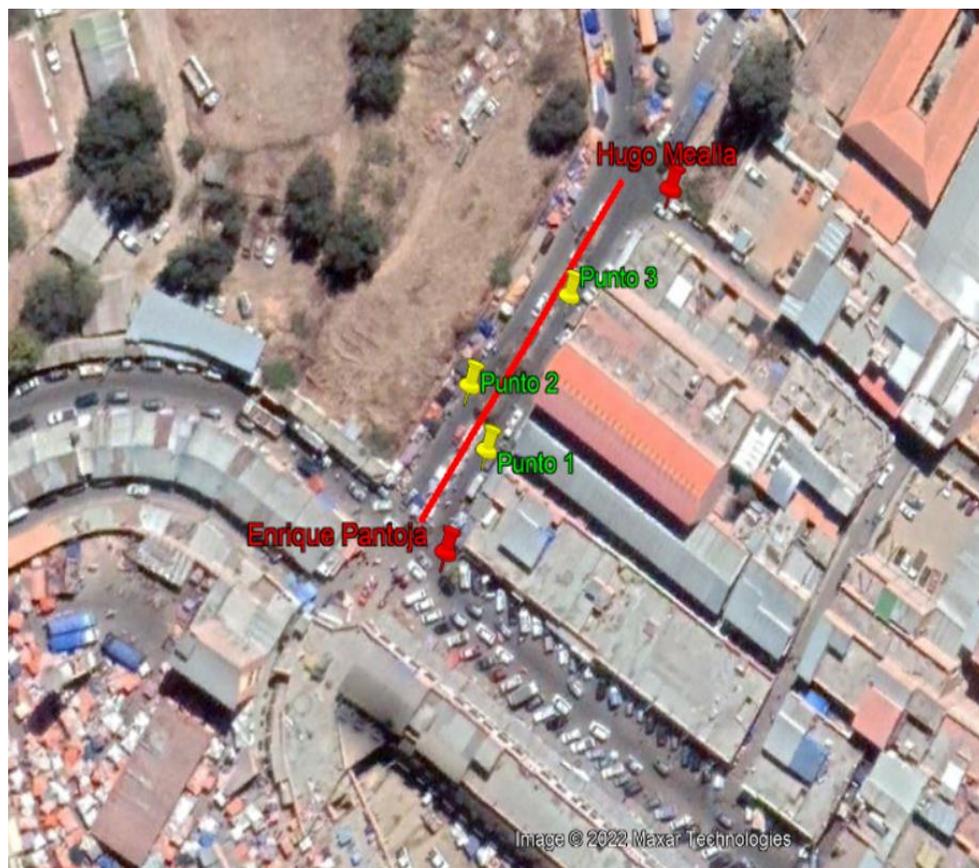
Sobre este tramo se localizan 7 puntos de muestreos:

- Punto 1, 2 y 3: Se localizan en la parte inicial, media y final del tramo que va desde el hotel Los Ceibos hasta el ex zoológico respectivamente.
- Punto 4, 5, 6 y 7: Se localizan en la parte inicial, media y final del tramo que va desde la calle Azucena hasta la pasarela del colegio Fe y Alegría respectivamente.

### Tramo N°3:

#### Av. Defensores del Chaco (Zona Mercado Campesino)

**Figura 1.3: Localización satelital av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)**

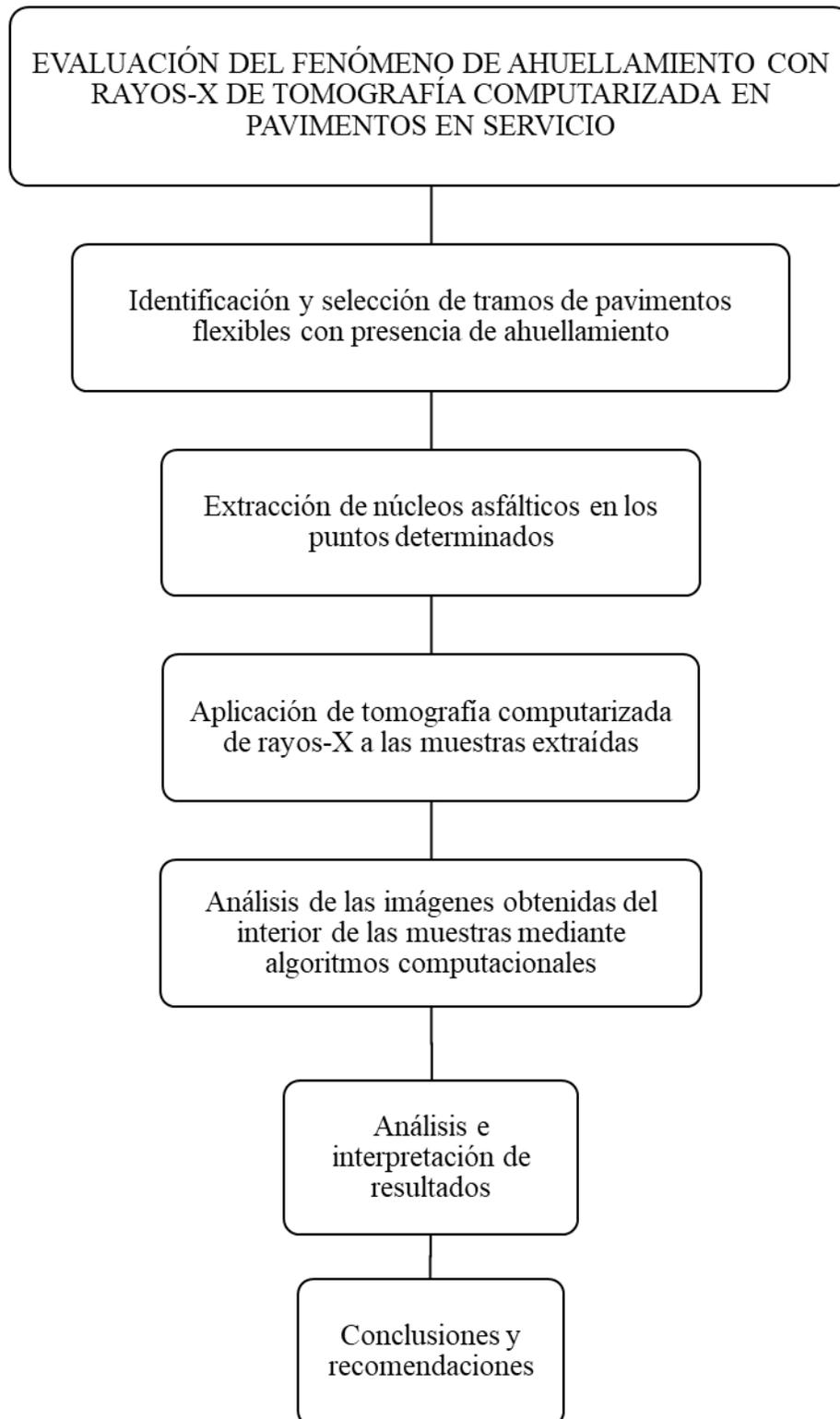


Fuente: Google Earth

Sobre este tramo se localizan 3 puntos de muestreos:

- Punto 1, 2, y 3: Localizados en el tramo de la av. Defensores del Chaco entre calles Enrique Pantoja y Hugo Mealla.

### 1.5.5. Procedimientos de aplicación



## **1. Identificación y selección de tramos de pavimentos flexibles con presencia de ahuellamiento**

Como punto de partida del proyecto de aplicación se tiene la selección de tramos de pavimentos flexibles en vías de la ciudad de Tarija, en donde a través de una inspección visual se evidencie daño por ahuellamiento en la superficie de rodadura, en estos tramos escogidos se definirán puntos para la toma de muestras para luego someterlas a tomografía computarizada de rayos-x, el total de puntos de muestreo serán 18, de los cuales se extraerán un total de 36 núcleos asfálticos con ahuellamiento. Adicionalmente también se extraerán 16 núcleos asfálticos de los tramos considerados para el proyecto, de partes que no presenten ahuellamiento, para realizar una comparación.

## **2. Extracción de núcleos asfálticos en los puntos determinados**

Una vez ya definidos los puntos de muestreo en los tramos de pavimentos flexibles seleccionados, se procederá a la extracción de los núcleos asfálticos en cada uno de los 18 puntos de muestreo con ahuellamiento establecidos en el proyecto, el proceso de extracción de núcleos consistirá en extraer 2 muestras por cada punto (1 muestra en cada huella de circulación), así tendremos en total 36 muestras con ahuellamiento. De las partes en buenas condiciones se extraerán 16 muestras sin ahuellamiento para su evaluación mediante tomografía computarizada de rayos-x.

Para el proceso de extracción de núcleos asfálticos se utilizará el equipo extractor de núcleos que se encuentra disponible en el laboratorio de asfaltos de la U.A.J.M.S., teniendo el debido cuidado de evitar que el testigo asfáltico se disgregue durante la operación de corte.

## **3. Aplicación de tomografía computarizada de rayos-x a las muestras extraídas**

En esta etapa se llevará las muestras extraídas a tomografía para obtener las imágenes digitalizadas del interior de los núcleos de capa asfáltica haciendo el uso de un tomógrafo, el cual es utilizado en el campo médico, utiliza una fuente motorizada de rayos-x que gira alrededor de una abertura circular de una estructura en forma de dona llamada gantry. Durante un escaneo por (TC), el objeto permanece inmóvil en una mesa que se mueve

lentamente a través del gantry, mientras que el tubo de rayos-x gira alrededor del objeto, disparando haces angostos de rayos-x a través del objeto. Cuando los rayos-x salen del objeto, son captados por los detectores y transmitidos a una computadora.

El número total de muestras de núcleos de capa asfáltica como ya mencionamos anteriormente serán 52 en total, de las cuales 36 serán muestras extraídas de pavimentos con ahuellamiento y 16 muestras que no presenten ahuellamiento, cada muestra se colocará de manera individual dentro del equipo del tomógrafo para obtener de cada núcleo 1 imagen transversal de su parte central, obteniendo un total de 52 imágenes para realizar el procesamiento y análisis posterior.

#### **4. Análisis de las imágenes obtenidas del interior de las muestras mediante algoritmos computacionales**

Una vez ya obtenidas las imágenes digitales de las muestras de núcleos asfálticos, estas serán importadas al programa de análisis de imágenes denominado ImageJ, para realizar su evaluación y así determinar las características internas que presenta cada muestra en cuanto al porcentaje de vacíos y el contacto agregado-agregado.

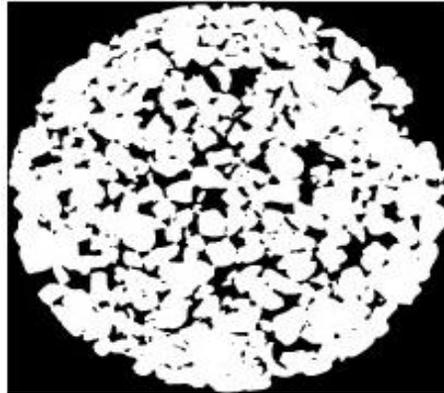
##### **- Análisis de porcentaje de vacíos**

La identificación de los vacíos al interior de los núcleos de capa asfáltica se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-x.

El color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados).

Para realizar este análisis se procederá a importar las imágenes computarizadas obtenidas por el equipo tomográfico al software de procesamiento de imágenes ImageJ, el cual este programa analiza como imagen binaria, es decir una imagen que mantendrá solo dos códigos en su matriz de colores de pixeles, el valor 0 identificado por el color negro y 255 identificado por el color blanco, es decir se hace una transformación de una imagen monocromática imagen en escala de grises a una imagen binaria imagen en blanco y negro.

**Figura 1.4: Imagen en composición binaria**



**Fuente:** Ingeniería e Investigación vol.28 no.2 Bogotá May/Ago. 2008

El programa debido a que el aire es el elemento más liviano dentro de todos los componentes de la mezcla procede a darle al pixel, que es ocupado por aire, un código con el valor de 0 es decir color negro para los vacíos y para los agregados el valor de 255 con el color blanco.

El programa nos brinda una imagen que muestra la distribución de los vacíos de la mezcla donde nos mide el área en porcentaje que serían los vacíos que se presentan en el interior de los núcleos de capa asfáltica, es decir separando los agregados de los vacíos.

La resolución de la imagen proporcionada por el tomógrafo es de 520 x 520 pixeles.

#### **- Análisis de contacto agregado-agregado**

El análisis de esta variable es por conteo visual de los puntos de contacto agregado-agregado presente en cada imagen.

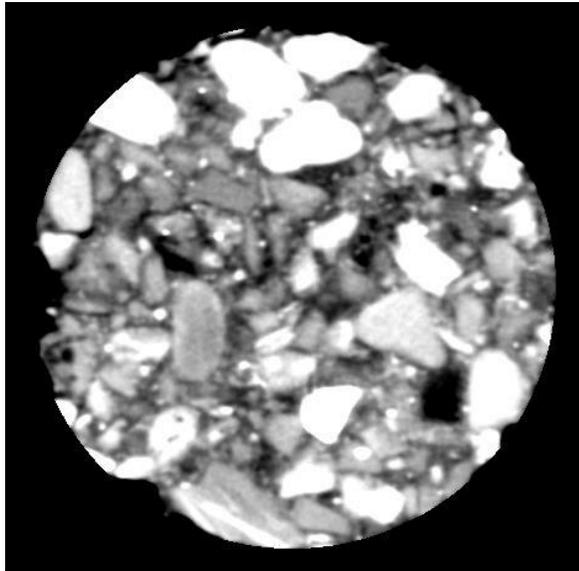
Se cuantifica el número de contactos entre agregados a partir de imágenes bidimensionales del interior de los núcleos extraídos, tomando en cuenta las partículas que son retenidas en la malla N°4 (4,75 mm) que son las que comprenden el agregado grueso, por lo que se identificó el valor de pixel que delimitará los agregados gruesos de los finos.

Por lo cual el valor límite de separación de agregados es de 62, es decir, todas las partículas de colores con código menor a este serán pigmentadas de color rojo, lo cual facilita el conteo de puntos de contacto ya que resaltará los agregados gruesos.

El valor de 62 es recomendado por el autor del método que nos permite validar el dato obtenido, ya que este es un valor medio de los valores analizados en cada imagen.

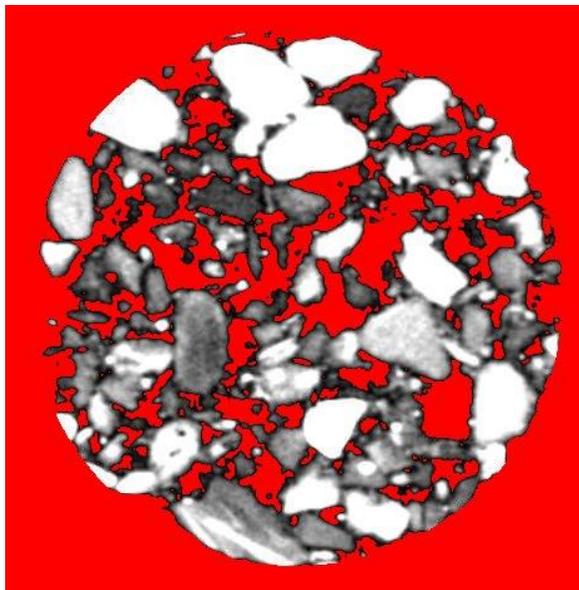
Una vez aplicado el pigmento rojo se procede al conteo de puntos de contacto en el esqueleto formado por los agregados gruesos.

**Figura 1.5: Imagen sin pigmentación**



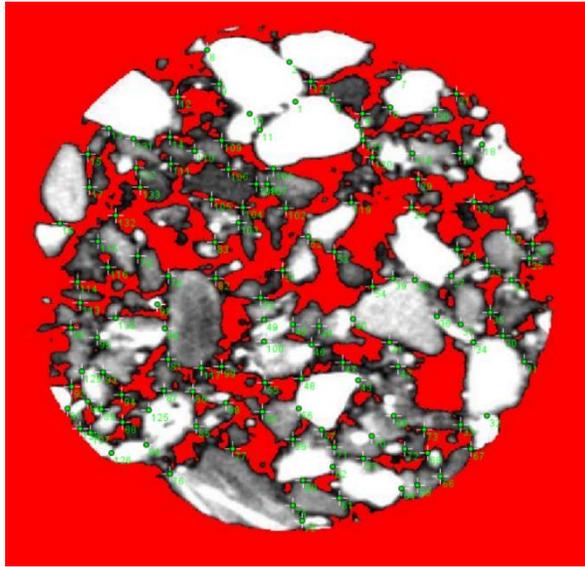
Fuente: Programa ImageJ

**Figura 1.6: Imagen con pigmentación roja**



Fuente: Programa ImageJ

**Figura 1.7: Identificación de puntos de contacto**



**Fuente:** Programa ImageJ

## **5. Análisis e interpretación de resultados**

Para realizar el análisis e interpretación de los resultados obtenidos sobre la evaluación de ahuellamiento en pavimentos flexibles a partir de tomografía computarizada de rayos-x (TC-RX) se presentará tablas y gráficos que expongan de manera adecuada la información obtenida de las diferentes muestras extraídas de los distintos tramos de pavimento flexible seleccionados que fueron sometidas a tomografía.

Se realizará el análisis entre las variables de contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos, para determinar una posible relación entre ambas.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

Con los resultados obtenidos de todo este trabajo de aplicación se establecerán conclusiones acerca del comportamiento presentado por los vacíos y del contacto entre agregados dentro de la estructura interna de las muestras de núcleos de capa asfáltica analizadas mediante la técnica de tomografía computarizada de rayos-x.

Por último, en recomendaciones se mencionará los aciertos y dificultades que se hubiesen presentado durante el transcurso del proyecto de aplicación de esta técnica de tomografía en la evaluación del ahuellamiento.

## 1.5.6. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

### - Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es el conjunto de métodos que implican la recolección, presentación y caracterización de un conjunto de datos a fin de describir en forma apropiada las diversas características de estas. Es decir, un estudio estadístico se considera “descriptivo” cuando solo se analiza y describe los datos.

Las variables estadísticas se pueden clasificar por diferentes criterios. Según su medición existen dos tipos de variables:

- Cualitativa (o categórica): son las variables que pueden tomar como valores cualidades o categorías.
- Cuantitativas (o numérica): variables que toman valores numéricos.

### - Medidas de posición central

#### Media aritmética

En la práctica, la medida de posición de mayor uso y más conocida es la media aritmética.

Definimos media aritmética de un conjunto de datos  $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$  al valor característico de una serie de datos resultado de la suma de todas las observaciones dividido por el número total de datos.

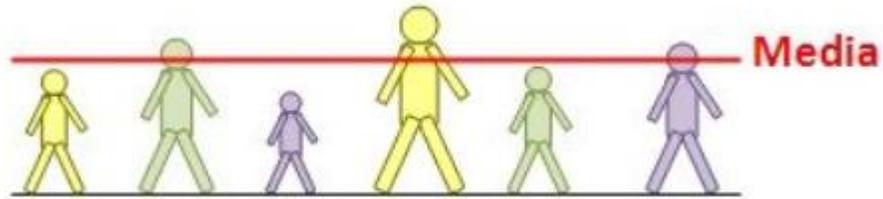
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$
$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Donde:

$\bar{X}$  = Media aritmética

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  = Conjunto de observaciones

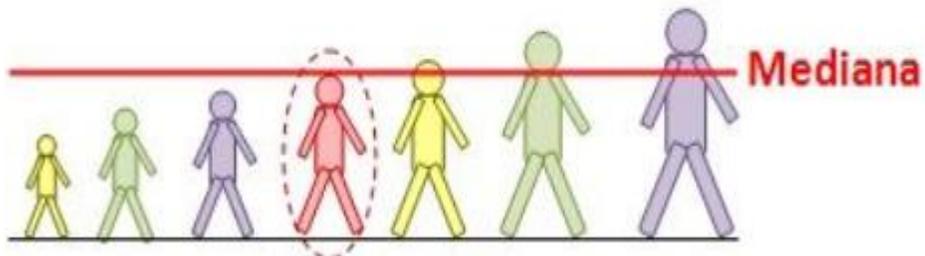
N= Número de observaciones



### Mediana

La mediana es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana  $Me(X)$  es el elemento de un conjunto de datos ordenados  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  que deja a izquierda y derecha la mitad de valores.

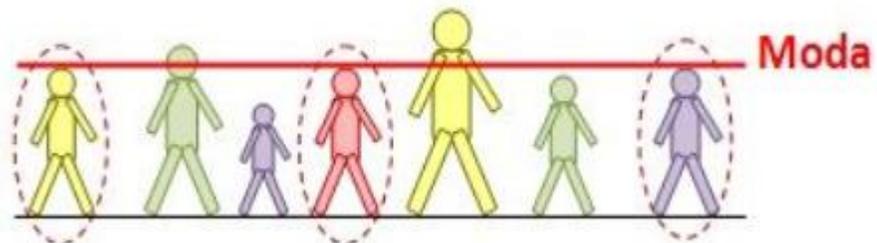


Si el conjunto de datos no está ordenado, la mediana es el valor del conjunto tal que el 50% de los elementos son menores o iguales y el otro 50% mayores o iguales.

### Moda

Otra medida de posición de amplio uso es la moda, que sin imaginárselo se usa frecuentemente.

La moda  $Mo(X)$  es el valor más repetido del conjunto de datos, es decir, el valor cuya frecuencia relativa es mayor. En un conjunto puede haber más de una moda.



## Media ponderada

La media ponderada (MP) es una medida de centralización. Consiste en otorgar a cada observación del conjunto de datos  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  unos pesos  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$  según la importancia de cada elemento.

$$MP = \frac{p_1 X_1 + p_2 X_2 + \dots + p_N X_N}{p_1 + p_2 + \dots + p_N}$$

Donde:

MP= Media ponderada

$X_1, X_2, \dots, X_N$  = Conjunto de datos

$p_1, p_2, \dots, p_N$  = Pesos

Cuanto más grande sea el peso de un elemento, más importante se considera que es éste.

## - Medidas de dispersión

### Varianza

La varianza es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de mayor uso.

La varianza ( $S^2$ ) mide la dispersión de los datos de una muestra respecto a la media, calculando la media de los cuadrados de las distancias de todos los datos.

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

Donde:

$\bar{X}$  = Media aritmética

$X_1, X_2, \dots, X_N$  = Conjunto de datos

## **Desviación estándar**

Con base en la varianza, otra medida de dispersión es la desviación estándar o desviación típica.

La desviación típica o desviación estándar “S” de las observaciones  $X_1, X_2, \dots, X_N$  de una característica X, se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir:

$$S = \sqrt{S^2}$$

Donde:

S= Desviación estándar

$S^2$ = Varianza

## **Coefficiente de variación de Pearson**

El coeficiente de variación de Pearson (r) mide la variación de los datos respecto a la media, sin tener en cuenta las unidades en la que están.

El coeficiente de variación toma valores entre 0 y 1. Si el coeficiente es próximo al 0, significa que existe poca variabilidad en los datos y es una muestra muy compacta. En cambio, si tienden a 1 es una muestra muy dispersa y la media pierde confiabilidad. De hecho, cuando el coeficiente de variación supera el 30% (0,3) se dice que la media es poco representativa.

Para interpretar fácilmente el coeficiente, podemos multiplicarlo por cien para tenerlo en tanto por cien.

$$r = \frac{S}{|\bar{X}|}$$

Donde:

S= Desviación estándar

$\bar{X}$ = Media aritmética

### **1.5.7. Alcance**

El alcance del presente proyecto de aplicación se enfocará en la evaluación de ahuellamiento en pavimentos flexibles mediante el uso de la tecnología denominada tomografía computarizada de rayos-x, que hace uso de las imágenes bidimensionales en escala de grises obtenidas a través de la irradiación de rayos-x a las muestras de núcleos de capa asfáltica extraídas de los puntos de muestreo seleccionados con presencia de ahuellamiento y de aquellos que no presenten ahuellamiento y la cuantificación posterior de las diferencias de intensidad de radiación inicial y final, estas imágenes digitalizadas se analizarán mediante software de análisis de imágenes para poder visualizar como se encuentra la estructura interna en lo que respecta al comportamiento de los vacíos y del contacto entre las partículas de agregado presentes en los núcleos extraídos de pavimentos en servicio de la ciudad de Tarija.

La identificación de los vacíos al interior de las muestras de núcleo se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-x, el color de cada partícula en la imagen bidimensional está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados).

Para todo lo anterior expuesto, previamente se procederá a una revisión de toda la información referente al tema que nos serán útiles para llevar adelante el estudio de la manera correcta, como paso siguiente se identifica la problemática que rodea al fenómeno de ahuellamiento en pavimentos flexibles, así como las razones que lo justifican para llevar adelante esta aplicación, además se mencionan los objetivos que se pretenden alcanzar al finalizar el desarrollo de esta evaluación.

Mediante la elaboración de este proyecto de aplicación de tomografía computarizada de rayos-x para la evaluación de ahuellamiento en pavimentos flexibles se pretende difundir esta técnica para que esté disponible para el uso de la sociedad involucrada en el área de la ingeniería y para las instituciones encargadas del mantenimiento de los proyectos de pavimentación.

En el capítulo I se empieza con una breve introducción mencionando los factores causantes de los deterioros en los pavimentos flexibles, poniendo énfasis en el fenómeno de ahuellamiento y su evaluación a través de la técnica de tomografía computarizada de rayos-x, luego se presenta la justificación del por qué se quiere realizar esta aplicación y el planteamiento del problema de este estudio que nos lleva a considerar ejecutar la evaluación de la estructura interna de las capas asfálticas afectada por el ahuellamiento, con todo lo expuesto previamente se establecen el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar una vez finalizado el desarrollo del proyecto, se propone la hipótesis y son identificadas las variables dependientes e independientes a analizar, por último se expone el diseño metodológico que se llevará a cabo en este estudio de aplicación, considerando importante el flujograma de aplicación que muestra los pasos secuenciales de ejecución del proyecto.

En el capítulo II para llevar adelante el desarrollo del proyecto de aplicación es determinante tener una base sólida de conocimientos, para lo cual en este capítulo se expone una revisión bibliográfica de los conceptos básicos sobre tipos de pavimentos, funciones y ventajas sobre el pavimento flexible, las partes que componen su estructura como ser: carpeta de rodadura, base y subbase y subrasante. Posteriormente se mencionan los tipos de daños que se presentan en pavimentos flexibles realizando una explicación a detalle en el fenómeno de ahuellamiento, en los tipos y causas que generan la aparición de este daño en la carpeta de rodadura.

Por último, se da a conocer la metodología de tomografías computarizadas de rayos-x, su campo aplicativo y el procedimiento a seguir para su utilización como un método de evaluación de ahuellamiento en pavimentos flexibles, para así conocer las características que presenta su estructura interna.

En el capítulo III se da inicio a la parte práctica, este capítulo es considerado uno de los más importantes de todo el proyecto, ya que es el que aporta con los conocimientos encontrados a la sociedad, debido a la aplicación de la técnica de tomografía computarizada de rayos-x. Aquí se ejecutan secuencialmente los pasos mostrados en el flujograma de aplicación para ir cumpliendo los objetivos trazados.

Inicia con la identificación y selección de tramos de pavimentos flexibles que presenten ahuellamiento en su superficie, luego se procede a extraer muestras de núcleos asfálticos de los puntos de muestreo determinados, ya contando con las muestras extraídas se realiza su evaluación mediante la metodología de tomografía computarizada de rayos-x, consiguiendo con esta técnica imágenes bidimensionales de la estructura interna de las muestras de capa asfáltica para proceder a analizar dichas imágenes mediante algoritmos computacionales, consiguiendo cuantificar el porcentaje de vacíos y el número de puntos de contacto entre agregados presentes en estas muestras afectadas por ahuellamiento, por último se hará un análisis de los resultados encontrados a través de la aplicación de esta tecnología, para establecer posibles relaciones entre las variables de porcentaje de vacíos y la de contacto de agregado.

En el capítulo IV una vez realizado el análisis de los resultados encontrados sobre la evaluación de ahuellamiento en pavimentos flexibles mediante la aplicación de rayos-x de tomografía computarizada se dan a conocer las conclusiones que concierne al presente documento y por último establecer recomendaciones basadas en la experiencia adquirida durante este proceso.

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS Y SU EVALUACIÓN DE AHUELLAMIENTO POR IMÁGENES DE RAYOS-X

#### 2.1. PAVIMENTOS

El pavimento se puede definir como un conjunto de capas superpuestas de un cierto material, colocados sobre el terreno natural, con granulometría definida en función de la forma y tipo de carga a recibir sobre ella. Ya sea en forma directa; cargas de tránsito, o indirecta transmitida por los estratos sobre estas.<sup>1</sup>

Constituido primordialmente para proporcionar comunicación terrestre, es diseñado para la finalidad de proporcionar una superficie óptima para el tránsito de vehículos. Tales como livianos, pesados. Inclusive otro tipo de transporte como bicicletas, motocicletas, etc.

Las propiedad y características del pavimento como son su número de capas y espesor de estas serán diferentes en la medida de su sollicitación y del tipo de pavimento propuesto, como son el pavimento rígido y flexible.

Un pavimento para cumplir sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ofrecer resistencia ante la acción de cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial aceptable a las velocidades previstas del tránsito.
- Presentar una resistencia al desgaste abrasivo de las llantas.
- Debe presentar regularidad superficial tanto transversal como longitudinalmente tal que permita la comodidad a los usuarios.
- Presentar comportamiento aceptable respecto al drenaje y sub drenaje.

---

<sup>1</sup> Barrera Fuentes, A. G. (2018). *Calibración de Modelos de Ahuellamiento para Pavimentos Flexibles del Programa HDM-4 en el Salvador*. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos a fin de salvaguardar al usuario.
- El ruido generado por la fricción entre las llantas contra el pavimento debe ser tal que no perturbe el sentido auditivo del usuario.

## **2.2. TIPOS DE PAVIMENTO**

Hay tres clases de pavimentos, dependiendo del material de construcción y de la forma como reciben y controlan las cargas:

### **2.2.1. Flexibles**

Son los construidos con capas de mezcla asfáltica. La superficie se apoya sobre una o más capas que ayudan a soportar las cargas. Proporcionan una superficie de rodadura muy confortable para el usuario de la vía.

El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o estacionamientos.

**Figura 2.1: Pavimento flexible**



**Fuente:** [ingecivil.net](http://ingecivil.net)

### **2.2.2. Articulados**

Construidos con adoquines (bloques de concreto o arcilla prefabricados), que se colocan sobre una capa de arena. Esta se apoya sobre una capa granular o directamente sobre la subrasante.

**Figura 2.2: Pavimento articulado**



Fuente: ingecivil.net

### **2.2.3. Rígidos**

Se componen de losas de concreto hidráulico colocadas sobre una o varias capas de material seleccionado. La capacidad estructural depende casi totalmente de la losa.

**Figura 2.3: Pavimento rígido**



Fuente: ingecivil.net

## **2.3. PAVIMENTO FLEXIBLE**

Se le llama pavimento flexible aquella estructura de una vía que se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Están conformados por las siguientes capas: capa superficial, capa de rodadura o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico, cuya función principal es soportar las cargas de tránsito y transmitir los esfuerzos al terreno. Normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas de alta calidad con espesor relativamente delgado, es decir, material pétreo cementado con

asfalto, comparada con las demás capas que conforman la estructura del pavimento. La capa base es la capa subyacente a la capa de rodadura construida a base de agregados granular y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub-base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base.<sup>2</sup>

**Figura 2.4: Sección transversal de un pavimento flexible**



Fuente: canacem.org.mx

Es así que la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga. En términos económicos la capa con más alto costo tanto en construcción, como en mantenimiento es la capa superior o capa de rodadura, siendo la más económica la que recibe menor capacidad de carga; es decir la capa inferior, sub base.

La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

#### **2.4. FUNCIONES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE**

El pavimento flexible o asfáltico cumple con dos funciones específicas:

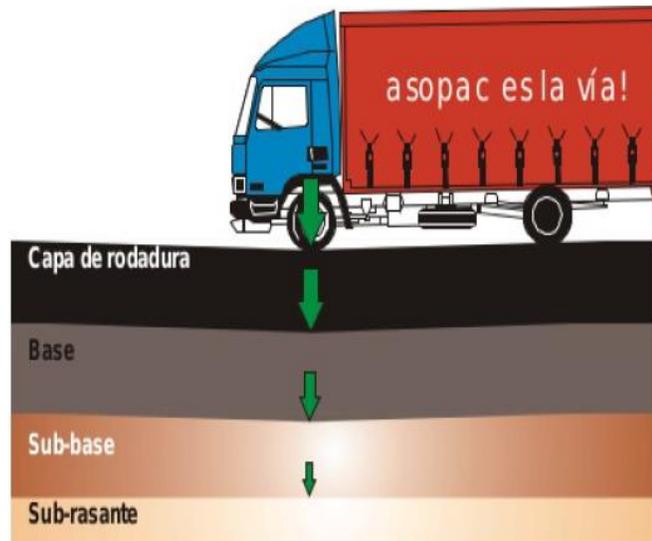
- El pavimento flexible proporciona una superficie segura y de comodidad para el usuario.

---

<sup>2</sup> Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia. (2004). Cartilla del Pavimento Asfáltico. ASOPAC, 1-51. asopac@asopac.com

- Las capas de la estructura soportan la mayor parte de las cargas de los vehículos y el resto lo trasladan al terreno o subrasante.

**Figura 2.5: Distribución de cargas en el pavimento flexible**



**Fuente:** asopac

Además de estas dos funciones específicas, el pavimento flexible debe cumplir con otras características, que se pueden dividir en técnicas (propias del pavimento) y de seguridad y comodidad para el usuario de la vía.

### **Características técnicas**

Son todas aquellas que hacen que los pavimentos sean durables, económicos y resistentes a los fenómenos climáticos y del tránsito.

### **Características de seguridad y comodidad**

Los pavimentos flexibles deben ser drenantes, es decir, evacuar rápidamente el agua de lluvia. Deben presentar una homogeneidad en la superficie para que el tránsito sea cómodo. La superficie debe ser capaz de absorber el ruido y tener el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.

## **2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE**

### **2.5.1. Ventajas**

- Proporciona la suficiente resistencia a las cargas impuestas por el tráfico vehicular.
- El costo de construcción es menor que en el pavimento rígido y con las nuevas tecnologías, los pavimentos flexibles requieren un mantenimiento mínimo.
- Por su color oscuro, evita reflejos y deslumbramientos causantes de accidentes.
- Es reciclable en su totalidad, lo que trae importantes ventajas ambientales, ecológicas y económicas.
- El tiempo de restauración de una vía en concreto hidráulico puede tardar días, en mezcla asfáltica apenas unas pocas horas.
- La contaminación auditiva por el paso de los vehículos, se reduce en nueve decibeles si el vehículo rueda sobre una superficie de concreto asfáltico que de hidráulico. En volumen, esto equivale a 4 veces menos ruido.
- Ofrece gran suavidad en el rodamiento, lo que permite ahorrar hasta un 4.5 % en el consumo de combustible.

### **2.5.2. Desventajas**

- Para cumplir con su vida útil requiere de un mantenimiento constante.
- Las cargas pesadas producen ahuellamientos y dislocamientos en el asfalto y son un peligro potencial para los usuarios. Esto constituye un serio problema en intersecciones, casetas de cobro de peaje, donde el tráfico está constantemente frenando y arrancando. Los ahuellamientos llenos de agua de lluvia en estas zonas, pueden causar deslizamientos, pérdida de control del vehículo y, por lo tanto, dar lugar a accidentes y a lesiones personales.
- Los ahuellamientos, dislocamientos, agrietamientos por temperatura, agrietamientos tipo piel de cocodrilo (fatiga) y el intemperismo, implican un tratamiento frecuente a base de selladores de grietas y de recubrimientos superficiales.

- Las distancias de frenado para superficies de asfalto son mucho mayores que para las superficies de hormigón sobre todo cuando el asfalto está húmedo y con huellas.
- Una vez que se han formado huellas en un pavimento de asfalto, la experiencia ha demostrado, que la colocación de una sobrecarpeta de asfalto sobre ese pavimento no evitará que se vuelva a presentar.

## **2.6. PARTES DEL PAVIMENTO FLEXIBLE**

Los pavimentos flexibles se componen de una capa llamada carpeta de rodadura, apoyada sobre dos capas llamadas base y sub-base. Todo el conjunto se apoya sobre el terreno o sub-rasante, al cual llega una mínima parte de la carga vehicular.

### **2.6.1. Carpeta de rodadura**

Proporciona una superficie estable, uniforme y antideslizante, todo lo cual se traduce en comodidad para el usuario de la vía. Soporta la mayor parte de las cargas vehiculares y efectos ambientales como la lluvia y la radiación solar. Sirve como capa impermeabilizante, impidiendo el paso de agua al interior del pavimento, y al mismo tiempo la drena evitando el deslizamiento de los vehículos.

La carpeta asfáltica es la capa que se coloca en la parte superior del paquete estructural, sobre la base, y es la que le proporciona la superficie de rodamiento a la vía.

La carpeta debe proporcionar al pavimento flexible una superficie de rodamiento estable, capaz de resistir la aplicación directa de las cargas, la fricción de las llantas, los esfuerzos de drenaje, los producidos por las fuerzas centrífugas, los impactos; debe tener la textura necesaria para permitir un rodamiento seguro y cómodo.

Cumple la función de impermeabilizar la superficie evitando el ingreso de agua que podría saturar las capas inferiores. También evita la desintegración de las capas subyacentes y contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos (cuando se construye con espesores mayores a 2.5 cm).

La carpeta es elaborada con material pétreo seleccionado y un aglomerante que es el asfalto. Es de gran importancia conocer el contenido óptimo de asfalto a emplear, para garantizar que la carpeta resista las cargas a la que será sometida. Un exceso de asfalto en la mezcla puede provocar pérdida de estabilidad, e incluso hacer resbalosa la superficie.

Esta capa es la más expuesta al intemperismo y a los efectos abrasivos de los vehículos, por lo que necesita de mantenimientos periódicos para garantizar su adecuada performance.

**Figura 2.6: Capa de rodadura**



**Fuente:** asopac

### **2.6.2. Base**

Su función principal es resistir los esfuerzos inducidos por los vehículos y dar un soporte homogéneo a la carpeta de rodadura, transmitiendo a las capas inferiores que las soportan (sub-base y sub-rasante) una mínima porción de la carga. Es una capa semirrígida, que puede ser granular, granular estabilizada o asfáltica.

Es la capa de pavimento ubicada debajo de la superficie de rodadura y tiene como función primordial soportar, distribuir y transmitir las cargas a la sub base, que se encuentra en la parte inferior.

La base, la función fundamental de la base es estructural y consiste en proporcionar un elemento resistente a la acción de las cargas del tránsito y capaz de transmitir los esfuerzos

resultantes con intensidades adecuadas. La base tiene también una importante función drenante, según la que debe ser capaz de eliminar fácil y rápidamente el agua que llegue a infiltrarse a través de la carpeta, así como de impedir la ascensión capilar del agua que provenga de niveles inferiores.

La base puede estar constituida principalmente por material granular, como piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; pero también puede estar conformada con cemento Portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada. Estas deben tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie y transmitirla hacia los niveles inferiores del paquete estructural.

**Figura 2.7: Base asfáltica**



**Fuente:** asopac

### **2.6.3. Subbase granular**

Se construye con materiales más económicos que las dos anteriores para que los espesores de las dos capas anteriores sean menores. También homogeniza la transferencia de carga a la subrasante.

La subbase se localiza en la parte inferior de la base, por encima de la subrasante. Es la capa de la estructura de pavimento destinada a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la carpeta asfáltica.

La subbase también se coloca para absorber deformaciones perjudiciales en la subrasante; por ejemplo, cambios volumétricos asociados a cambios de humedad, que podrían llegar a reflejarse en la superficie del pavimento. Básicamente conviene buscar dos cualidades

principales en un material de subbase, que son la resistencia friccionante y la capacidad drenante.

Otra función de la subbase consiste en servir de transición entre el material de la base, generalmente granular grueso y el de la subrasante, que tiende a ser mucho más fino. La subbase actúa como filtro de la base e impide su incrustación en la subrasante.

Está conformada por materiales granulares, que le permiten trabajar como una capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, evitando fallas producidas por el hinchamiento del agua, causadas por el congelamiento, cuando se tienen bajas temperaturas. Además, la subbase controla los cambios de volumen y elasticidad del material del terreno de fundación, que serían dañinos para el pavimento.

Los espesores de subbase son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 o 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

#### **2.6.4. Terreno natural o subrasante**

La subrasante es aquella que soporta el pavimento. Las técnicas de mejoramiento o estabilización del suelo buscan mejorar las características del terreno, pues de estas, dependerá en gran medida, el espesor total del pavimento.

**Figura 2.8: Preparación de la subrasante**



**Fuente:** asopac

Un suelo se puede mejorar o estabilizar por medios mecánicos (compactación) o con productos químicos especialmente diseñados para tal fin (cal, cemento, etc.).

Se define como subrasante al terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural o estabilizado o por material de préstamo debidamente compactado para alcanzar el 95% de la máxima densidad seca obtenida mediante el ensayo de Proctor modificado.

La subrasante es la capa de terreno que soporta el paquete estructural y que se extiende hasta una profundidad en la cual no influyen las cargas de tránsito.

Esta capa puede estar formada en corte o relleno, dependiendo de las características del suelo encontrado. Una vez compactada, debe tener las propiedades, secciones transversales y pendientes especificadas de la vía. El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la sub rasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad.

El comportamiento estructural de un pavimento frente a cargas externas, varía de acuerdo a las capas que lo constituyen. La principal diferencia entre el comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos es la forma cómo se reparten las cargas.

En un pavimento flexible, la distribución de la carga está determinada por las características del sistema de capas que lo conforman. Las capas de mejor calidad están cerca de la superficie donde las tensiones son mayores, y estas cargas se distribuyen de mayor a menor a medida que se va profundizando hacia los niveles inferiores.

En el caso de pavimentos rígidos, la losa es la capa que asume casi toda la carga. Las capas inferiores a la losa, en términos de resistencia, son despreciables.

En los pavimentos rígidos, las cargas se distribuyen uniformemente debido a la rigidez del concreto, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

En cambio, los pavimentos flexibles tienen menor rigidez, por eso se deforma más que el rígido y se producen tensiones mayores en la subrasante.

## **2.7. DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

### **2.7.1. Fisuras y grietas**

#### **2.7.1.1. Fisura piel de cocodrilo**

Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanza su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente como una serie de fisuras longitudinales paralelas; luego por efecto de la repetición evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. Si la base y la sub-base son débiles, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos. Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera estancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache. La misma sección del pavimento presentará fisuras y grietas de cocodrilo, ahuellamiento y baches.<sup>3</sup>

#### **2.7.1.2. Fisura en bloque**

Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m<sup>2</sup>. La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

#### **2.7.1.3. Fisuras en arco**

Son fisuras en forma de media luna (o más precisamente de cuarto creciente) que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en

---

<sup>3</sup> Ing. Coronado I., J. (2000). Catálogo Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales. *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, III*, 1–52.

arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito. Por ejemplo, si se frena el vehículo cuesta abajo, la dirección de las fisuras está cuesta arriba.

#### **2.7.1.4. Fisura transversal**

Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento.

#### **2.7.1.5. Fisura longitudinal**

Fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable.

#### **2.7.1.6. Fisura por reflexión de junta**

Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación ascendente hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales y/o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

### **2.7.2. Deformaciones superficiales de pavimentos flexibles**

#### **2.7.2.1. Ahuellamiento**

Es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de la llanta de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes de la zona deprimida y de fisuración. Un Ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidropilaje por almacenamiento de agua.

#### **2.7.2.2. Corrimiento**

Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando "cordones", principalmente

laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera. Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento.

#### **2.7.2.3. Corrugación**

Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1 m entre ellas, a lo largo del pavimento.

#### **2.7.2.4. Hinchamiento**

Abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.

#### **2.7.2.5. Hundimiento**

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.

### **2.7.3. Desintegración en los pavimentos flexibles**

#### **2.7.3.1. Bache**

Desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares.

#### **2.7.3.2. Peladura**

Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura del pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima.

#### **2.7.3.3. Desintegración de bordes**

Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en

las que existe una significativa porción de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

#### **2.7.4. Otros deterioros en los pavimentos flexibles**

##### **2.7.4.1. Exudación de asfalto**

Consiste en el afloramiento de un material bituminoso de la mezcla asfáltica a la superficie del pavimento, formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante el tiempo cálido.

##### **2.7.4.2. Descenso de la berma**

Corresponde a una diferencia de elevación entre la calzada y la berma, debido a un desplazamiento de la berma. Permite la infiltración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento, provocando su deterioro.

##### **2.7.4.3. Surgencia de finos y agua**

Este afloramiento corresponde a la salida de agua infiltrada, junto con materiales finos de la capa de base por las grietas, cuando circulan sobre ellas las cargas de tránsito. La presencia de manchas o de material acumulado en la superficie cercana al borde de las grietas indica la existencia del fenómeno. Se encuentra principalmente en pavimentos semirrígidos (con base estabilizada).

##### **2.7.4.4. Separación entre berma y pavimento**

Este daño indica el incremento en la separación de la junta existente entre la calzada y la berma. Este daño permite la infiltración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento provocando su deterioro.

#### **2.8. AHUELLAMIENTO**

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, cual consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Se

produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento y altas temperaturas de servicio.<sup>4</sup>

Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, dificultando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad.

**Figura 2.9: Fenómeno de ahuellamiento**



**Fuente:** XV Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos – 2005

La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, midiendo esta con una regla de 1.20 m de longitud colocada transversalmente al eje de la carretera; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor. Se identifican tres niveles de severidad:

B (Bajo): La profundidad promedio es menor de 10 mm.

M (Mediano): La profundidad promedio es entre 10 y 25 mm.

A (Alto): La profundidad promedio es mayor de 25 mm.

---

<sup>4</sup> Thenoux Z., G., & Carrillo O., H. (2002). Análisis de Casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. *6to Congreso Internacional Provia*. 1–16.

## **2.9. TIPOS DE AHUELLAMIENTO**

### **2.9.1. Ahuellamiento en la capa asfáltica**

El efecto se presenta en los primeros 7 a 10 cm de mezcla más cercanos a la superficie. La mezcla asfáltica bajo esta profundidad se encuentra aislada térmicamente y además está sometida a esfuerzos menores que las capas superiores. Este tipo de ahuellamiento es independiente del diseño estructural del pavimento.

### **2.9.2. Ahuellamiento producido en capas subyacentes**

En este caso las causas pueden ser, principalmente, una mala compactación de las bases granulares o tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante. Es decir, las causas en este caso son de tipo constructivo o de diseño estructural del pavimento.

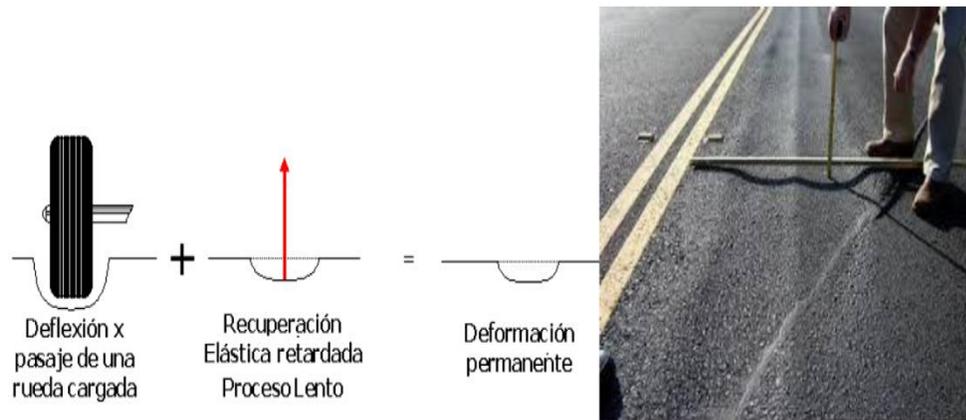
El perfil transversal de la deformación es diferente en cada caso (ahuellamiento de la mezcla o de capas inferiores) y es relativamente fácil de distinguir para un profesional con experiencia. En cierta bibliografía se suele utilizar la palabra “ahuellamiento” (rutting en inglés) para referirse a la deformación plástica de la mezcla asfáltica y la palabra “deformación” para referirse a las deformaciones por tensiones de las capas subyacentes.

El ahuellamiento de la capa asfáltica ocurre por la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. El asfalto (y por ende la mezcla) exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, es decir, las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica.

## **2.10. CAUSAS DEL AHUELLAMIENTO**

En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son despreciables, sin embargo, existen factores que tienden a aumentar la tasa de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento. Estos factores, que normalmente actúan en conjunto, están relacionados al clima y al tráfico.

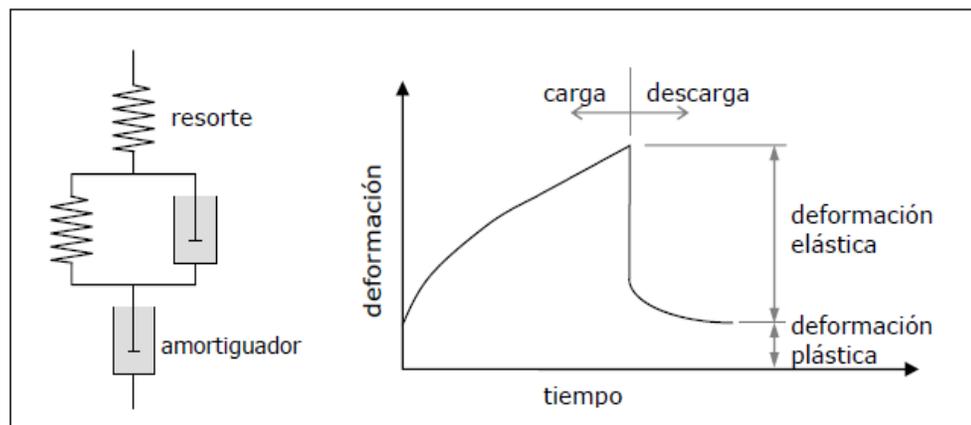
**Figura 2.10: Deformaciones permanentes (ahuellamiento)**



**Fuente:** Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

El ahuellamiento de la capa asfáltica ocurre por la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. El asfalto (y por ende la mezcla) exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, es decir, las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula. Este efecto se muestra en la Figura 2.11, que muestra el modelo reológico de un material viscoelástico desarrollado por Maxwell y las componentes de deformación ante un ciclo carga - descarga.

**Figura 2.11: Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos**



**Fuente:** Análisis de casos de ahuellamiento en M.A. Chilenas

### **2.10.1. Altas temperaturas**

El ahuellamiento generalmente se produce en verano, ya que las temperaturas altas aumentan la componente plástica de deformación del asfalto, por lo tanto, aumentan las deformaciones remanentes. En ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres veranos consecutivos.

### **2.10.2. Cargas pesadas**

Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la velocidad de deformación de la mezcla.

### **2.10.3. Circulación a bajas velocidades**

El tráfico lento disminuye la rigidez del asfalto, por lo que aumenta la componente plástica de deformaciones, es decir, se produce un efecto equivalente a un aumento de la temperatura de servicio.

Por otra parte, una mezcla asfáltica puede ser más o menos resistente a las deformaciones, en función de una serie de factores de diseño, como grado asfáltico, propiedades del agregado y parámetros de dosificación.

### **2.10.4. Efecto del grado asfáltico**

La selección del grado asfáltico debe hacerse principalmente en base al clima, sin embargo, también influyen factores de proyecto, como el nivel de tránsito y las velocidades de circulación. Es por esto que en la actualidad se considera que las especificaciones por penetración no son suficiente para garantizar un buen desempeño del asfalto.

El sistema Superpave ha propuesto una solución al tema de la selección del grado asfáltico mediante una especificación basada en el comportamiento. Así es posible seleccionar un asfalto de acuerdo a las condiciones específicas del proyecto, de acuerdo al grado PG XYY, que determina el rango de temperaturas de desempeño adecuado del asfalto.

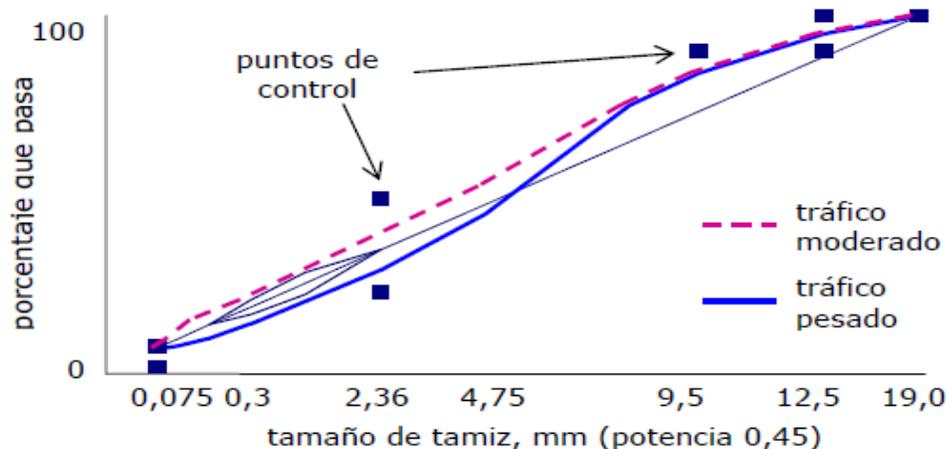
## 2.10.5. Efecto del agregado

### (a) Granulometría

Las mezclas tradicionales se producen en base a granulometrías continuas o densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio, pueden ser susceptibles de ahuellarse. Recientes investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. El mismo concepto es aplicado en las mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt o Stone Matrix Asphalt). La cantidad de agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos, sin interferir en su contacto interpartícula, y así sucesivamente con los tamaños más finos.

La figura 2.12 muestra la banda Superpave TM 19 (en formato Superpave). La recomendación de diseño es que a medida que el tráfico aumenta, la granulometría se acerque al límite inferior de la banda en los tamaños finos (a partir de 4,75 o 2,36), como muestra la figura. Cuando hay un exceso de arenas de tamaño medio, la mezcla puede ser inestable en condiciones extremas de servicio. Esto produce una deformación paulatina de la mezcla, y un reacomodo interno de las partículas, acercándose unas a otras. Cuando las partículas gruesas quedan en contacto, de modo que proveen suficiente fricción interna, la deformación se detiene.

**Figura 2.12: Granulometría para tráfico pesado y moderado**



**Fuente:** Análisis de casos de ahuellamiento en M.A. Chilenas

## **b) Forma y textura**

Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del agregado. Las partículas rodadas obtenidas de depósitos fluviales normalmente tienen una textura lisa y una forma redondeada, por lo que no son adecuadas para producir mezclas asfálticas, puesto que no proveen suficiente fricción interna para resistir las cargas.

Las partículas que se obtienen en plantas de chancado tienen forma angulosa y textura rugosa, producto de la trituración mecánica. Estas partículas proveen grandes fricciones internas que las hacen adecuadas para producir mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento.

### **2.10.6. Propiedades volumétricas de la mezcla**

Numerosos informes de investigación, así como textos de estudio, concuerdan que el contenido de vacíos es, por sí solo, el parámetro de desempeño más importante de una mezcla asfáltica.

Existe acuerdo en que el rango adecuado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 a 8 % (Brown, 1990; Asphalt Institute, 1997). Para contenidos de vacíos bajo 3 %, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8 %, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración.

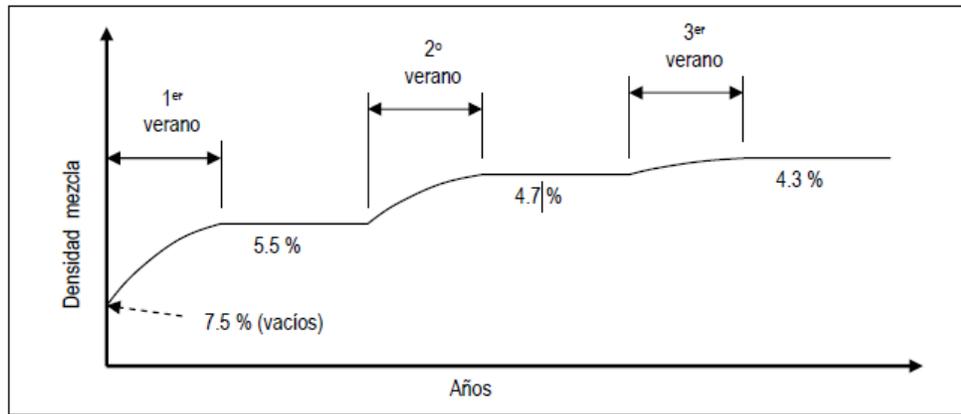
Para determinar el contenido asfáltico óptimo, el criterio de diseño del método Marshall especifica un contenido de vacíos de 3 a 5 %, mientras que el método Superpave especifica un 4 %. Estos valores se refieren a la condición de la mezcla tras dos a tres años de servicio, una vez que ha sido compactada por el tráfico.

Por lo tanto, para alcanzar esta condición en terreno, es necesario compactar la mezcla hasta un nivel de vacíos cercano al 8 %, ya que el tráfico densificará la mezcla hasta su nivel final, en el rango de 3 a 5 %.

Una sobrecompactación de la mezcla, ya sea por error de diseño, exceso de compactación durante la colocación, o por un tráfico pesado no considerado durante el diseño, producirá

una disminución en el contenido de vacíos que puede producir el ahuellamiento y/o la exudación de la mezcla.

**Figura 2.13: Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica**



**Fuente:** Análisis de casos de ahuellamiento en M.A. Chilenas

Otros parámetros volumétricos relacionados con el ahuellamiento y exudación, que están relacionados al contenido de vacíos, son el VMA y contenido asfáltico.

El VMA, o contenido de vacíos del agregado mineral, es una propiedad que depende del agregado (forma y granulometría) y del contenido asfáltico. Valores de VMA muy bajos pueden indicar que en terreno el asfalto no tendrá suficiente espacio y que por lo tanto podría ahuellarse y/o exudar. Valores de VMA muy altos también se han asociado con el ahuellamiento, ya que se requerirá un mayor contenido asfáltico para cumplir las especificaciones de diseño (FHWA, 2001).

Por otro lado, el contenido asfáltico está relacionado con el contenido de vacíos. La estabilidad Marshall, a pesar de no ser un parámetro relevante en el comportamiento de las mezclas frente al ahuellamiento, muestra cómo afecta el contenido asfáltico al comportamiento mecánico de las mezclas. Hasta cierto valor, la estabilidad aumenta con incrementos en el contenido asfáltico. A partir de dicho valor, la estabilidad de la mezcla disminuye con nuevos incrementos en el contenido asfáltico. Esto se debe al efecto lubricante que produce un exceso de asfalto, que reduce el contacto entre las partículas de agregado y por lo tanto disminuye la fricción interna de la mezcla. En cuanto al efecto del contenido asfáltico sobre la resistencia al ahuellamiento, los estudios realizados en USA indican que el contenido asfáltico es más incidente en la susceptibilidad al ahuellamiento

que el grado asfáltico, aunque es menos importante que el contenido de vacíos (Brown, Cross, 1992).

## **2.11. DETERMINACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Existen diversos equipos para determinar el ahuellamiento; dependiendo de sus características se suelen clasificar como equipos de alto y bajo rendimiento.<sup>5</sup>

### **2.11.1. Equipos de alto rendimiento**

Los principales equipos de alto rendimiento son el perfilómetro láser y el perfilómetro óptico.

#### **2.11.1.1. Perfilómetro láser**

**Figura 2.14: Perfilómetro láser**



**Fuente:** cedex.es

El perfilómetro láser es un equipo basado en la medida de distancias por medio de láser, preparado para registrar los perfiles longitudinales y transversales de las carreteras, así como para tomar simultáneamente datos de textura. Las mediciones se realizan con el vehículo circulando totalmente integrado en el tráfico.

El equipo permite:

---

<sup>5</sup> Administradora Boliviana de Carreteras. (2015). *Manual de Ensayos de Suelos y Materiales, Asfaltos*.

- Obtener distintos índices de regularidad superficial de los firmes, haciendo posible la auscultación sistemática de la red de carreteras.
- Detectar problemas relacionados con la regularidad transversal de los firmes (ahuellamientos, zonas de posible formación de charcos, etc.).
- Determinar de manera continua la profundidad de textura.

Dispone de una viga extensible de referencia, en la cual están integrados 15 láseres de medida de 32 kHz. Delante de la viga está situada la cámara de textura con un láser de 64 kHz. También dispone de un equipo autónomo de posicionamiento global (GPS).

Con la viga extendida, en la posición de funcionamiento, es capaz de medir un ancho total de 2,90 m de calzada en una sola pasada, gracias a que sus dos láseres externos están inclinados.

El perfil y la profundidad de textura se pueden obtener simultáneamente o cada uno por separado.

### **Características técnicas**

Velocidad de medida: De 30 a 120 km/h.

Intervalo de medida: A selección del usuario (10 mm o superior).

Principio de medida: Triangulación con láser desde un plano de referencia definido por giróscopos ópticos y acelerómetros.

Frecuencia de muestreo: Para los láseres encargados de medir el perfil: 32kHz.

Para el encargado de obtener la profundidad de textura: 64 kHz.

Frecuencia de respuesta: Plana ( $\pm 3$  dB) desde 0,2 Hz hasta 2 kHz.

Ancho de banda: En términos de longitud de onda, desde 0,01 m hasta 100 m, a 72 km/h.

Resolución: Vertical: 0,05 mm. Horizontal: 3 mm, independientemente de la velocidad.

### **Aplicaciones**

Medida y registro de perfiles longitudinales y transversales.

Obtención (simultánea o no) de la medida de textura.

Obtención, en el procesado del índice de regularidad internacional (IRI) y otros índices de regularidad superficial.

Auscultación de grandes redes de carreteras.

#### **2.11.1.2. Perfilómetro óptico**

Este equipo utiliza el sistema sensor luz de no – contacto, compuesto de una fuente de luz, un receptor (o sensor de luz) y una electrónica asociada que registran el perfil del camino con alta precisión.

El perfilómetro DNC 690 está equipado con ocho sensores ópticos de altura, los cuales están montados en la carrocería del vehículo entre el eje trasero y el frente. Una cubierta protege a los sensores de altura para prevenir las lecturas que se vean afectadas por la luz solar. Los problemas más comunes con estos perfilómetros, es la incapacidad de los sensores para recabar datos en pavimentos con oscuridad y contaminación de los datos del perfil por la luz solar.

El equipo mide perfiles de carreteras a velocidades normales desde 15 a 90 kilómetros por hora.

**Figura 2.15: Perfilómetro óptico K. J. Law DNC 690**



**Fuente:** K. J. Law Engineers

### 2.11.1.3. 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 2.16, se aprecia al TPL en su configuración de 3,0 m.

**Figura 2.16: Transverse profile logger (TPL)**



**Fuente:** udec.cl

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. Se recomienda 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 cocientes 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:  $\text{Distancia} = A + B \cdot \text{Elevación}$ , en que Distancia es la distancia medida en mm, y Elevación 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.

### **2.11.2. Equipos de bajo rendimiento**

Los equipos de bajo rendimiento más característicos son el perfilógrafo transversal, la toma de perfiles por métodos manuales con reglas graduadas y los perfilómetros portátiles.

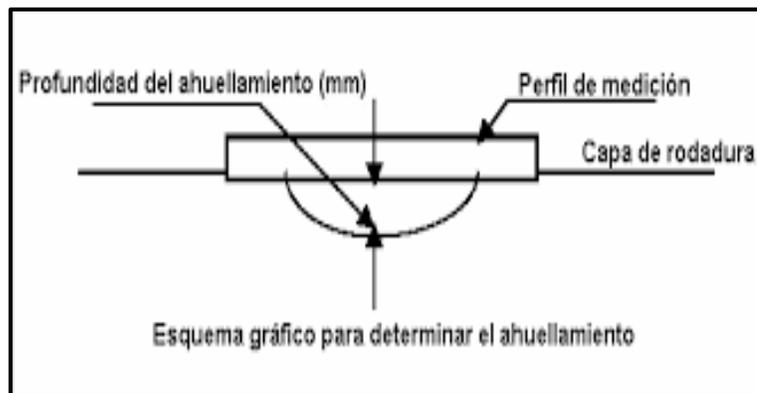
Los procedimientos de calibración y operación de los equipos dependen de las indicaciones de los respectivos fabricantes.

Los procedimientos a seguir al utilizar unos u otros de estos equipos son los que se indican a continuación.

### 2.11.2.1. Perfiles y reglas graduadas

Un perfil metálico indeformable, de sección rectangular (ancho mínimo 20 mm y altura mínima 30 mm), de al menos 1,5 m de largo, se coloca en forma transversal y en 90° respecto al eje de la pista, desde uno de los bordes hacia el centro. Luego se desliza una escuadra, regla o cuña metálica debidamente graduada al milímetro por debajo de este perfil, determinando y registrando la profundidad máxima que alcanza la depresión (ahuellamiento). El procedimiento se debe realizar en las dos huellas de una pista.

**Figura 2.17: Esquema gráfico para medición del ahuellamiento**



**Fuente:** Administradora Boliviana de Carreteras

**Figura 2.18: Medición de la profundidad de huella**



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.11.2.2. Perfilógrafo transversal

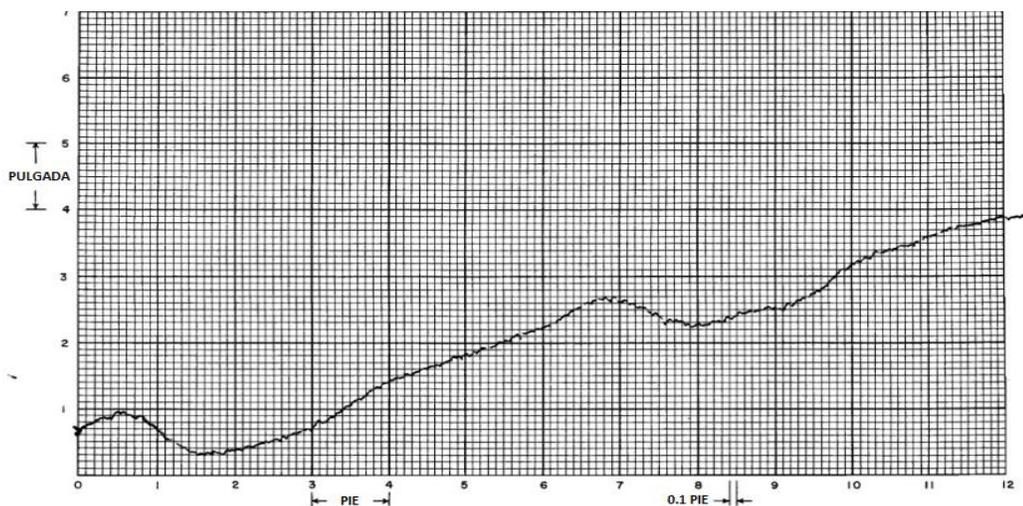
Consiste en extender el perfilógrafo sobre la calzada perpendicularmente al eje del carril (figura 2.19). Se nivela la viga del aparato para proporcionar una referencia horizontal y se conecta un transductor de desplazamiento lineal vertical a una rueda que se encuentra bajo la viga. A medida que la rueda es desplazada sobre la superficie del pavimento, el transductor se mueve en relación con la viga y el desplazamiento vertical de la rueda va quedando registrado en un gráfico (figura 2.20). De esta manera, se obtiene gráficamente un perfil transversal del carril, el cual sirve para determinar la deformación máxima por banda de rodadura, valor que corresponde al ahuellamiento

**Figura 2.19: Perfilógrafo transversal**



Fuente: Instituto Nacional de Vías

**Figura 2.20: Registro de un perfilógrafo transversal**



Fuente: Instituto Nacional de Vías

### 2.11.2.3. Perfilómetro portátil

Es un instrumento operado manualmente, capaz de medir el perfil o sección transversal de una pista mediante un sistema de inclinómetro - odómetro, extensómetro - odómetro u otro mecanismo similar. Para fines receptivos se debe generar un registro de al menos 10 puntos por pista, en base al cual se determina el ahuellamiento máximo en la pista auscultada.

**Figura 2.21: Perfilómetro portátil**



**Fuente:** Instituto Nacional de Vías

## 2.12. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X (TC-RX) PARA EVALUACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

La TC-RX se basa en la utilización de rayos-x para irradiar cuerpos y la cuantificación posterior de las diferencias de intensidad de radiación inicial y final, con base en las cuales es posible obtener imágenes digitales que pueden ser analizadas mediante software de análisis de imágenes o por inspección visual.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Álvarez, A. E., Carvajal, J. S., Fuentes, L. G., & Reyes, Ó. J. (2013). Principales hallazgos del análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas determinada a partir del uso de tomografía computarizada de rayos-x. *Memorias XIX Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos*, 99–104.

Los avances tecnológicos del último siglo han permitido que la ingeniería de pavimentos cuente con herramientas sofisticadas, cada vez más precisas y confiables para evaluar parámetros y características de los materiales utilizados para la construcción de vías.

Los desarrollos de equipos y software para la captura, procesamiento y análisis de imagen, abren la posibilidad de investigar el comportamiento de la estructura interna de los pavimentos flexibles frente al daño que produce el fenómeno de ahuellamiento, a partir de la evaluación de imágenes obtenidas por tomografía con rayos-x, de una manera más rápida y sencilla.

El procesamiento digital de imágenes es un campo de la ingeniería que se ha venido desarrollando actualmente buscando realizar una inspección y obtención de información de una forma más precisa y rápida, tiene un campo de aplicación amplio y diverso.

En particular, la TC-RX se ha utilizado recientemente en investigaciones de (Álvarez et al., 2008) debido principalmente a: 1) su carácter no destructivo, 2) la rapidez de los ensayos, 3) la facilidad de uso, 4) la confiabilidad de los resultados y 5) los costos de ensayo relativamente bajos en el contexto de actividades de investigación.

La tomografía computarizada con rayos-x se basa en la adquisición de imágenes usando rayos-x y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos medios porosos, tales como textiles, materiales biológicos, suelos y mezclas asfálticas.<sup>7</sup>

Los sistemas de rayos-x empleados en el análisis de mezclas asfálticas son similares a los utilizados en el ámbito médico. Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-x y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución.

La resolución de una imagen,  $R$ , puede definirse como la razón entre la dimensión del objeto analizado,  $L_x$ ,  $y$ , y el número de píxeles,  $\#p$ . Por lo tanto, una misma imagen puede

---

<sup>7</sup> Alvarez Lugo, Alex E., Mercado, Edith Arámbula, & Caro Spinel, Silvia. (2008). Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados. *Ingeniería e Investigación*, 28(2), 142-151.

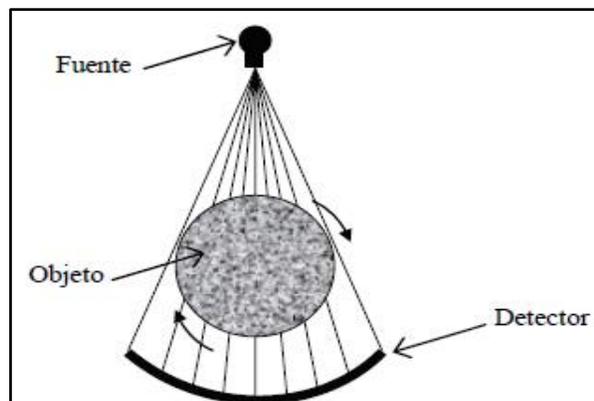
tener diferentes resoluciones,  $R_x$  o  $R_y$ , a lo largo de sus ejes, si las dimensiones del objeto son distintas:

$$R_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{\# p}$$

En general, es deseable contar con la mayor resolución posible, lo que se traduce en menores valores de  $R$ , es decir, una menor cantidad de material representada por cada pixel.

Existen diferentes equipos de rayos-x de uso industrial cuya clasificación depende del tamaño del objeto a observar y de su resolución: 1) convencional, 2) alta resolución, 3) ultra alta resolución, y 4) microtomografía.

**Figura 2.22: Sistema de rayos-x**



**Fuente:** Ingeniería e Investigación vol.28 no.2 Bogotá May/Ago. 2008

Los elementos básicos que conforman un equipo de rayos-x son una fuente y un detector. La geometría de los rayos-x y del detector varía dependiendo del equipo. Para el estudio de mezclas asfálticas típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea.

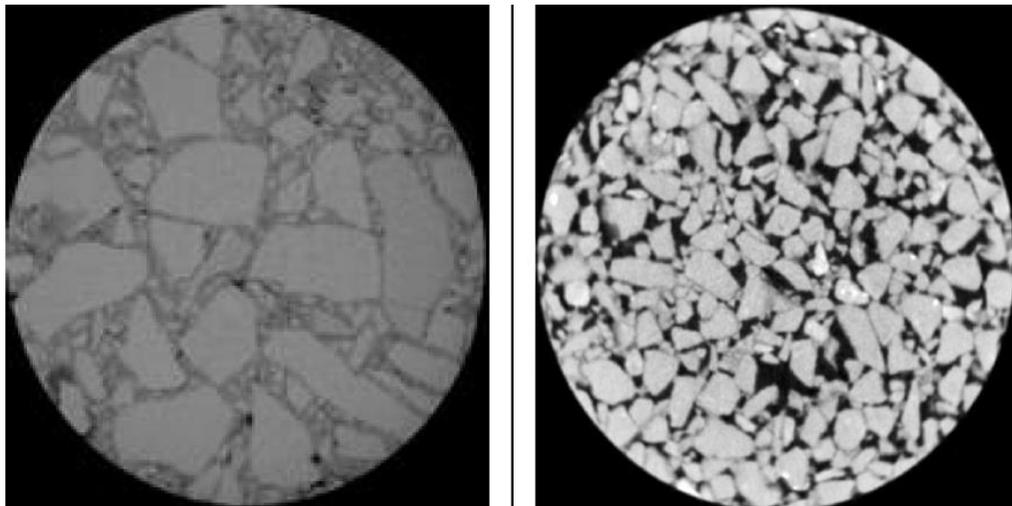
La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos-x que llegan al detector. Entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos-x son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina vista. Es común que la fuente y el detector, o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria.

De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales.

Dichas imágenes se denominan secciones, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal.

**Figura 2.23: Imágenes tomográficas**



**Fuente:** Ingeniería e Investigación vol.28 no.2 Bogotá May/Ago. 2008

Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matriz asfáltica y vacíos) y su distribución real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas asfálticas.

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-x. Como se mencionó previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados).

De esta manera, a la graduación de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco).

### **2.12.1. Imágenes digitales generadas con tomografía computarizada**

La tomografía computarizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que va a obtener la imagen.

El equipo a utilizar para este procesamiento se trata de un tomógrafo helicoidal multicorte de última generación que posee más detectores ubicados en forma de abanico, formando un sistema tubo-detectores, un arco móvil y una rotación continua alrededor de la mesa del objeto.

Genera imágenes a partir de la señal de atenuación que sufre, el haz está directamente relacionado con la densidad, el espesor atravesado y la composición del material, así como la energía del haz de rayos “x”. La TC utiliza esta información obtenida desde diferentes ángulos para determinar la configuración de la sección transversal con ayuda de un algoritmo de reconstrucción.

**Figura 2.24: Tomógrafo Toshiba Aquilion 16**



**Fuente:** Rayos X-CER Tomografía, Tarija

Una vez obtenidas las imágenes digitales de los núcleos asfálticos, estas son importadas al programa de análisis de imágenes ImageJ para poder evaluar sus características correspondientes al número de contactos entre agregados y el porcentaje de vacíos.

### **2.12.2. Descripción del software ImageJ**

El software ImageJ es una herramienta informática de procesamiento de imágenes digitales de dominio público programado en Java y desarrollado en el National Institutes of Health (Institutos Nacionales de Salud) de los Estados Unidos.

El ImageJ es una herramienta muy interesante para el procesamiento de imágenes. Se pueden realizar una variedad de operaciones y aplicarlas a las imágenes digitalizadas obtenidas con el tomógrafo; como ajustar el contraste, transformar una imagen color en una imagen blanco y negro. Además, se puede utilizar ImageJ para efectuar operaciones más sofisticadas sobre las imágenes como por ejemplo resaltar algunos detalles y ocultar otros.

Una imagen en blanco y negro, es un arreglo rectangular de puntos (píxeles) a cada uno de los cuales se le asigna un número entre 0 y 255. El valor 0 representa el negro y el valor 255 el blanco. Los números comprendidos entre 0 y 255 representan lo que se conoce como una escala de grises. Así las zonas oscuras de una imagen estarán representadas por píxeles con valores cercanos a 0 mientras que las zonas muy claras con píxeles cercanos a 255. Es decir que, formalmente, una imagen blanco y negro no difiere de una matriz y de hecho es una matriz. Cada elemento de la matriz representa un punto de la imagen y el valor de dicho punto es la intensidad que tiene la imagen en ese punto.

### CAPÍTULO III

## APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X PARA EVALUACIÓN DE AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

### 3.1. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

La ubicación de los puntos de muestreo de núcleos asfálticos considerados para el proyecto se localizan o están distribuidos sobre tres tramos de pavimento flexible de la ciudad de Tarija, dichos tramos fueron seleccionados a partir de una inspección visual, en la cual se constató el daño en la carpeta de rodadura por la presencia de ahuellamiento.

En estos tramos escogidos se definieron puntos de muestreo para extraer núcleos de capa asfáltica para su posterior evaluación mediante tomografía computarizada de rayos-x.

La distribución de los puntos de muestreo en los diferentes tramos es la siguiente:

**Tabla 3.1: Distribución de puntos de muestreo**

Nº	Tramo	Puntos
1	Tramo av. Panamericana Puente San Jorge II - Nueva terminal de buses	1
		2
		3
		4
		5
		6
		7
		8
2	Tramo av. Panamericana Hotel Los Ceibos - Pasarela colegio Fe y Alegría	1
		2
		3
		4
		5
		6
		7
3	Tramo av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)	1
		2
		3

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.1: Localización satelital av. Panamericana (Puente de San Jorge II – Nueva terminal de buses)**



Fuente: Google Earth

**Tabla 3.2: Coordenadas geográficas tramo N°1**

N° Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	21°33'15.69"S	64°41'19.18"O
Punto 2	21°33'20.90"S	64°41'12.01"O
Punto 3	21°33'29.12"S	64°41'0.64"O
Punto 4	21°33'37.49"S	64°40'48.88"O
Punto 5	21°33'45.21"S	64°40'38.19"O
Punto 6	21°33'46.79"S	64°40'36.09"O
Punto 7	21°33'48.34"S	64°40'34.13"O
Punto 8	21°33'48.84"S	64°40'33.27"O

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.2: Localización satelital av. Panamericana (Hotel Los Ceibos - Pasarela colegio Fe y Alegría)**



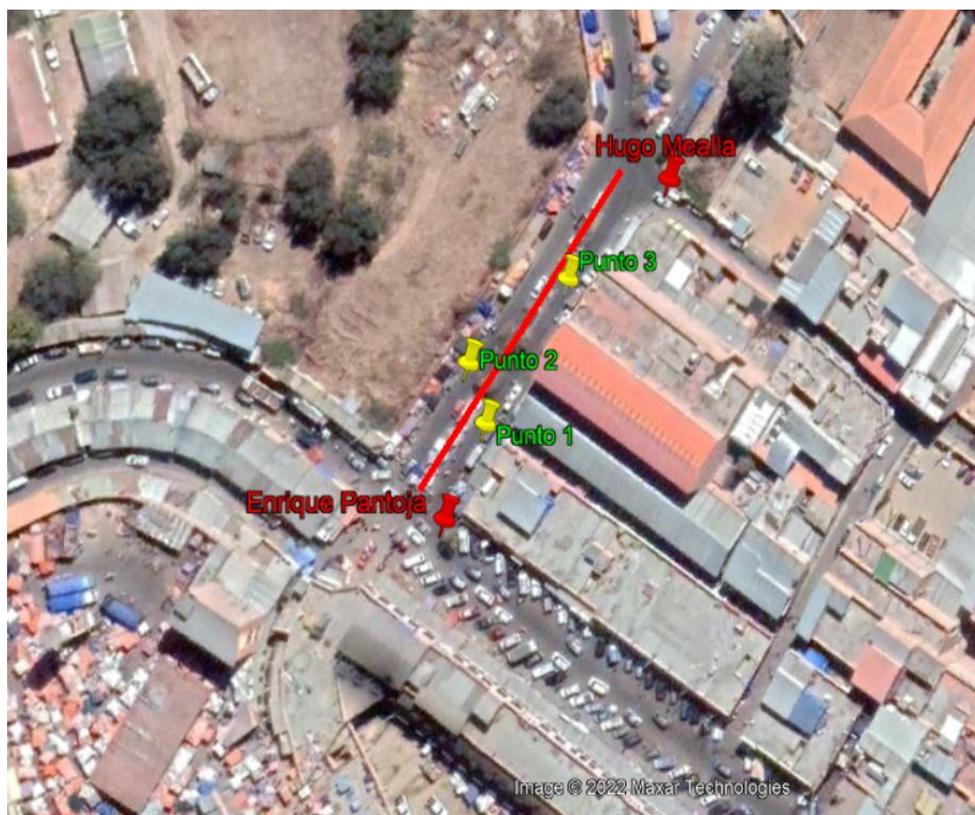
Fuente: Google Earth

**Tabla 3.3: Coordenadas geográficas tramo N°2**

Nº Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	21°31'51.16"S	64°44'25.34"O
Punto 2	21°31'46.45"S	64°44'24.38"O
Punto 3	21°31'41.07"S	64°44'23.21"O
Punto 4	21°31'36.43"S	64°44'22.25"O
Punto 5	21°31'30.04"S	64°44'23.63"O
Punto 6	21°31'24.40"S	64°44'24.99"O
Punto 7	21°31'23.97"S	64°44'23.97"O

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.3: Localización satelital av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)**



Fuente: Google Earth

**Tabla 3.4: Coordenadas geográficas tramo N°3**

N° Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	21°31'6.62"S	64°44'31.03"O
Punto 2	21°31'6.23"S	64°44'31.17"O
Punto 3	21°31'5.68"S	64°44'30.41"O

Fuente: Elaboración propia

### **3.2. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS ASFÁLTICOS**

La extracción de núcleos asfálticos para realizar la evaluación de ahuellamiento a través de tomografía computarizada de rayos-x se obtuvieron de tramos de pavimento flexible en servicio de la ciudad de Tarija que son: avenida Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses), avenida Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría) y avenida Defensores del Chaco (Mercado Campesino).

La extracción de los núcleos de capa asfáltica se realizó una vez ya definidos los puntos de muestreo en los diferentes tramos de pavimento seleccionados, en total se extrajeron 36 núcleos de las partes con ahuellamiento y 16 núcleos de las partes sin presencia de ahuellamiento. De esta forma se obtuvo un total de 52 núcleos para su evaluación mediante la aplicación de rayos-x de tomografía computarizada.

Para el proceso de extracción de las muestras de núcleos asfálticos se utilizó el equipo extractor del laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, tomando las debidas precauciones para la buena operación del equipo y así evitar que el testigo asfáltico se disgregue durante la operación de corte.

**Figura 3.4: Extracción de núcleos asfálticos**



**Fuente:** Elaboración propia

Las brocas deben ser las adecuadas respecto a calidad y dimensiones para el tipo de trabajo a realizar y deben encontrarse en buenas condiciones. El diámetro de la broca para realizar la extracción de núcleos para pavimentos de asfalto es de 4 pulgadas (100 mm).

**Figura 3.5: Relleno de punto de extracción**



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.6: Núcleos extraídos**



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.3. ALTURA DE AHUELLAMIENTO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS**

El ahuellamiento es un fenómeno que afecta a los pavimentos asfálticos que se manifiesta como una depresión longitudinal en la sección transversal y que de preferencia se localiza en las zonas del pavimento por donde circula la mayor parte del tránsito (huellas).

La medición de las alturas de los ahuellamientos en las huellas de circulación de los vehículos se la realizó siguiendo el procedimiento manual descrito en el método A0807 de la Administradora Boliviana de Carreteras, utilizando un perfil metálico de sección rectangular (ancho mínimo 20 mm y altura mínima 30 mm) de 1,5 m de largo, que se

coloca en forma transversal y en 90° respecto al eje del pavimento, luego se procede a medir la depresión (ahuellamiento) con el flexómetro por debajo del perfil metálico.

**Figura 3.7: Medición de ahuellamiento**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.5: Ahuellamientos - Tramo N°1**

Tramo	Punto de muestreo	N° de núcleo	Ahuellamiento (mm)
Tramo N°1	1	1	12,00
		2	15,00
	2	3	13,00
		4	11,00
	3	5	31,00
		6	34,00
	4	7	10,00
		8	13,00
	5	9	30,00
		10	32,00
	6	11	33,00
		12	34,00
	7	13	31,00
		14	34,00
	8	15	30,00
		16	35,00
<b>Media</b>			<b>24,88</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>10,18</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.6: Ahuellamientos - Tramo N°2**

Tramo	Punto de muestreo	N° de núcleo	Ahuellamiento (mm)
Tramo N°2	1	1	26,00
		2	30,00
	2	3	28,00
		4	27,00
	3	5	29,00
		6	27,00
	4	7	32,00
		8	34,00
	5	9	32,00
		10	34,00
	6	11	33,00
		12	35,00
	7	13	32,00
		14	33,00
<b>Media</b>			<b>30,86</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>2,98</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.7: Ahuellamientos - Tramo N°3**

Tramo	Punto de muestreo	N° de núcleo	Ahuellamiento (mm)
Tramo N°3	1	1	30,00
		2	26,00
	2	3	33,00
		4	31,00
	3	5	27,00
		6	29,00
<b>Media</b>			<b>29,33</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>2,58</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.4. PESO VOLUMÉTRICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS

Una vez obtenido tanto los núcleos extraídos de los tramos de pavimento flexible con presencia de ahuellamiento en su capa de rodadura y núcleos que no presentan este deterioro, los mismos fueron llevados a laboratorio para proceder a pesarlos y medir sus dimensiones (altura, diámetro) de dichos núcleos para determinar sus pesos volumétricos.

La determinación del peso volumétrico ( $\text{g/cm}^3$ ) de los núcleos se hará dividiendo su peso entre su volumen.

**Figura 3.8: Pesaje de núcleos**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.9: Medición de núcleos**



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1. Peso volumétrico de núcleos con ahuellamiento

**Tabla 3.8: Peso volumétrico de núcleos tramo N°1 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°1	1	1356,20	6,99	10,00	2,47
	2	1328,50	6,52	10,00	2,59
	3	1327,50	6,69	10,00	2,53
	4	1376,50	7,14	10,00	2,45
	5	1437,10	7,21	10,00	2,54
	6	1312,30	6,41	10,00	2,61
	7	1392,80	7,03	10,00	2,52
	8	1313,70	6,54	10,00	2,56
	9	1530,00	7,52	10,00	2,59
	10	1294,90	6,22	10,00	2,65
	11	1573,60	7,65	10,00	2,62
	12	1309,80	6,42	10,00	2,60
	13	1305,50	6,27	10,00	2,65
	14	1305,30	6,20	10,00	2,68
	15	1410,60	6,93	10,00	2,59
	16	1387,00	6,84	10,00	2,58
<b>Media</b>					<b>2,58</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,06</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9: Peso volumétrico de núcleos tramo N°2 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°2	1	1384,50	6,66	10,00	2,65
	2	1300,40	6,34	10,00	2,61
	3	1268,70	6,25	10,00	2,58
	4	1326,60	6,51	10,00	2,59
	5	1477,00	7,35	10,00	2,56
	6	1266,30	6,27	10,00	2,57
	7	1318,20	6,49	10,00	2,59
	8	1284,70	6,24	10,00	2,62
	9	1580,00	7,60	10,00	2,65
	10	1352,40	6,54	10,00	2,63
	11	1610,20	7,66	10,00	2,68
	12	1410,00	6,88	10,00	2,61
	13	1408,30	7,23	10,00	2,48
	14	1418,70	7,32	10,00	2,47
<b>Media</b>					<b>2,59</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,06</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10: Peso volumétrico de núcleos tramo N°3 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°3	1	1029,30	5,11	10,00	2,56
	2	1075,60	5,28	10,00	2,59
	3	1123,40	5,55	10,00	2,58
	4	1102,80	5,38	10,00	2,61
	5	1184,10	5,94	10,00	2,54
	6	1174,50	5,86	10,00	2,55
<b>Media</b>					<b>2,57</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,03</b>

Fuente: Elaboración propia

**3.4.2. Peso volumétrico de núcleos sin ahuellamiento****Tabla 3.11: Peso volumétrico de núcleos tramo N°1 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°1	1	1374,30	7,13	10,00	2,45
	2	1320,90	6,55	10,00	2,57
	3	1345,40	6,70	10,00	2,56
	4	1352,70	6,87	10,00	2,51
	5	1380,60	7,22	10,00	2,43
	6	1351,40	6,79	10,00	2,53
<b>Media</b>					<b>2,51</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,05</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12: Peso volumétrico de núcleos tramo N°2 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°2	1	1370,20	6,85	10,00	2,55
	2	1320,80	6,63	10,00	2,54
	3	1367,70	6,72	10,00	2,59
	4	1335,50	6,56	10,00	2,59
	5	1401,50	7,12	10,00	2,51
	6	1389,00	6,91	10,00	2,56
<b>Media</b>					<b>2,56</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,03</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.13: Peso volumétrico de núcleos tramo N°3 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	Peso (g)	Dimensiones		Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
			Altura (cm)	Diámetro (cm)	
Tramo N°3	1	1155,10	5,82	10,00	2,53
	2	1192,20	5,91	10,00	2,57
	3	1169,70	5,76	10,00	2,59
	4	1154,60	5,73	10,00	2,57
<b>Media</b>					<b>2,56</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,02</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS

La determinación del porcentaje óptimo de asfalto de los núcleos de capa asfáltica se realiza en base al procedimiento descrito en el método A0604 de la Administradora Boliviana de Carreteras, que consiste en obtener cuantitativamente el contenido de ligante asfáltico mediante el proceso de centrifugación, utilizando como solvente gasolina.

Calentamos la muestra en el horno para facilitar su disgregación, pesamos una cantidad para el ensayo en base al tamaño máximo nominal del agregado de la muestra analizada.

**Figura 3.10: Pesaje de muestra de ensayo**



Fuente: Elaboración propia

Se registra el peso el filtro antes del inicio del ensayo y luego de secarlo en el horno después de realizada la prueba, para determinar la diferencia de su peso. Se deposita la muestra en el plato del equipo y se añade la gasolina, se espera un tiempo máximo de 1

hora hasta que el solvente disgregue la muestra. Se enciende el equipo y se coloca un contenedor que recoja el solvente, este procedimiento se realiza no menos de 3 veces, para asegurar que se expulse el asfalto de la muestra y el solvente salga limpio.

**Figura 3.11: Muestra en el extractor centrífugo**



**Fuente:** Elaboración propia

Cuando el procedimiento de centrifugado concluye, se retira el plato del equipo y se vacía la muestra en una fuente y se coloca en el horno para su secado y posterior pesaje.

**Figura 3.12: Ensayo de extracción de asfalto**



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.1. Contenido de ligante asfáltico de núcleos con ahuellamiento

**Tabla 3.14: % Ligante asfáltico tramo N°1 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°1	1	1300,00	1225,80	16,75	18,47	1,72	5,58
	2	1300,00	1229,70	18,45	19,53	1,08	5,32
	3	1300,00	1228,50	18,95	19,98	1,03	5,42
	4	1300,00	1227,80	19,23	20,37	1,14	5,47
	5	1300,00	1226,50	19,67	20,72	1,05	5,57
	6	1300,00	1224,20	16,69	18,40	1,71	5,70
	7	1300,00	1228,70	18,23	19,38	1,15	5,40
	8	1300,00	1229,60	18,88	20,18	1,30	5,32
	9	1300,00	1225,10	19,57	20,61	1,04	5,68
	10	1300,00	1227,30	20,22	21,29	1,07	5,51
	11	1300,00	1224,90	16,71	18,33	1,62	5,65
	12	1300,00	1228,20	18,30	19,48	1,18	5,43
	13	1300,00	1227,90	19,45	20,77	1,32	5,44
	14	1300,00	1226,60	20,70	21,92	1,22	5,55
	15	1300,00	1225,70	17,60	18,80	1,20	5,62
	16	1300,00	1225,60	18,35	19,37	1,02	5,64
<b>Media</b>							<b>5,52</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,12</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.15: % Ligante asfáltico tramo N°2 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°2	1	1300,00	1225,90	16,72	18,45	1,73	5,57
	2	1300,00	1228,80	18,42	19,50	1,08	5,39
	3	1300,00	1226,90	19,00	19,98	0,98	5,55
	4	1300,00	1227,20	19,33	20,34	1,01	5,52
	5	1300,00	1229,90	19,89	20,91	1,02	5,31
	6	1300,00	1226,80	16,75	18,41	1,66	5,50
	7	1300,00	1228,70	18,30	19,34	1,04	5,40
	8	1300,00	1229,20	19,01	20,10	1,09	5,36
	9	1300,00	1228,10	19,74	20,78	1,04	5,45
	10	1300,00	1225,80	20,24	21,13	0,89	5,64
	11	1300,00	1226,20	16,76	18,37	1,61	5,55
	12	1300,00	1229,70	18,34	19,51	1,17	5,32
	13	1300,00	1225,00	18,36	19,52	1,16	5,68
	14	1300,00	1226,10	19,46	20,29	0,83	5,62
<b>Media</b>							<b>5,49</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,12</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.16: % Ligante asfáltico tramo N°3 - Ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°3	1	1300,00	1225,00	16,76	18,40	1,64	5,64
	2	1300,00	1226,40	18,39	19,45	1,06	5,58
	3	1300,00	1227,10	19,44	20,32	0,88	5,54
	4	1300,00	1227,90	20,28	21,14	0,86	5,48
	5	1300,00	1224,90	19,48	20,54	1,06	5,70
	6	1300,00	1227,70	19,79	20,74	0,95	5,49
<b>Media</b>							<b>5,57</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,09</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2. Contenido de ligante asfáltico de núcleos sin ahuellamiento

**Tabla 3.17: % Ligante asfáltico tramo N°1 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°1	1	1300,00	1225,10	16,75	18,35	1,60	5,64
	2	1300,00	1226,00	18,31	19,42	1,11	5,61
	3	1300,00	1227,80	19,15	20,18	1,03	5,47
	4	1300,00	1227,30	19,46	20,38	0,92	5,52
	5	1300,00	1224,70	19,85	20,85	1,00	5,72
	6	1300,00	1225,50	19,87	20,88	1,01	5,65
<b>Media</b>							<b>5,60</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,09</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.18: % Ligante asfáltico tramo N°2 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°2	1	1300,00	1229,70	17,45	18,55	1,10	5,32
	2	1300,00	1226,70	18,40	19,49	1,09	5,55
	3	1300,00	1226,50	19,20	20,22	1,02	5,58
	4	1300,00	1226,20	19,41	20,47	1,06	5,60
	5	1300,00	1225,80	19,90	20,74	0,84	5,64
	6	1300,00	1225,30	19,95	20,84	0,89	5,68
<b>Media</b>							<b>5,56</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,13</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.19: % Ligante asfáltico tramo N°3 – No ahuellado**

Tramo	N° de núcleo	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	Filtro (g)	Filtro + fino (g)	M <sub>3</sub> (g)	% asfalto
Tramo N°3	1	1300,00	1227,10	17,32	18,45	1,13	5,52
	2	1300,00	1225,20	18,33	19,20	0,87	5,69
	3	1300,00	1224,30	18,72	19,62	0,90	5,75
	4	1300,00	1225,90	19,55	20,41	0,86	5,63
<b>Media</b>							<b>5,65</b>
<b>Desviación estándar</b>							<b>0,10</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar las partículas de que está formado según su tamaño, esta separación se hace mediante una serie de tamices con mallas con tamaños de abertura diferentes, para las partículas de mayor diámetro como el agregado grueso y para las menores que constituyen el agregado fino.

El procedimiento está descrito en el método A0602 de la Administradora Boliviana de Carreteras, para el análisis granulométrico de áridos provenientes de extracción.

**Figura 3.13: Granulometría de áridos de extracción**



Fuente: Elaboración propia

### 3.6.1. Granulometría de núcleos de partes de pavimento ahuellados

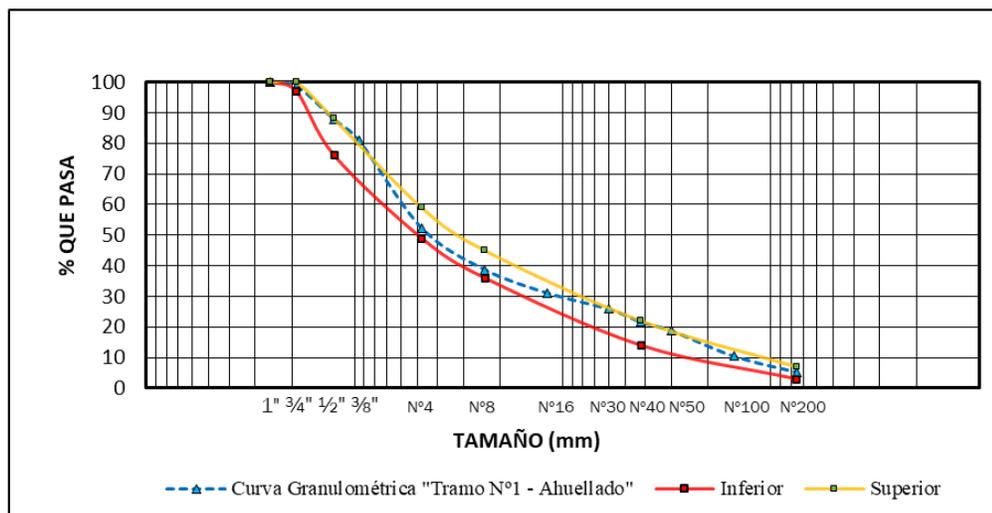
De los resultados del análisis granulométrico de los núcleos extraídos de cada uno de los tres tramos evaluados con ahuellamiento, se tiene que la gradación de los agregados de las curvas granulométricas promedios de cada tramo se ajustan a la faja granulométrica C, según normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras.

**Tabla 3.20: Granulometría tramo N°1 - Ahuellado**

Peso total (g)			1224,00				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf	Sup
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	15,13	15,13	1,24	<b>98,76</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	134,53	149,65	12,23	<b>87,77</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	84,09	233,74	19,10	<b>80,90</b>	-	-
N°4	4,75	349,18	582,93	47,62	<b>52,38</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	166,43	749,35	61,22	<b>38,78</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	93,10	842,45	68,83	<b>31,17</b>	-	-
N°30	0,60	64,29	906,74	74,08	<b>25,92</b>	-	-
N°40	0,42	51,80	958,54	78,31	<b>21,69</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	34,69	993,23	81,15	<b>18,85</b>	-	-
N°100	0,15	101,74	1094,96	89,46	<b>10,54</b>	-	-
N°200	0,075	63,99	1158,96	94,69	<b>5,31</b>	3,00	7,00
BASE	-	65,04	1224,00	100,00	<b>0,00</b>	-	-
<b>Suma</b>		1224,00					
<b>Pérdidas</b>		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.1: Curva granulométrica tramo N°1 - Ahuellado**



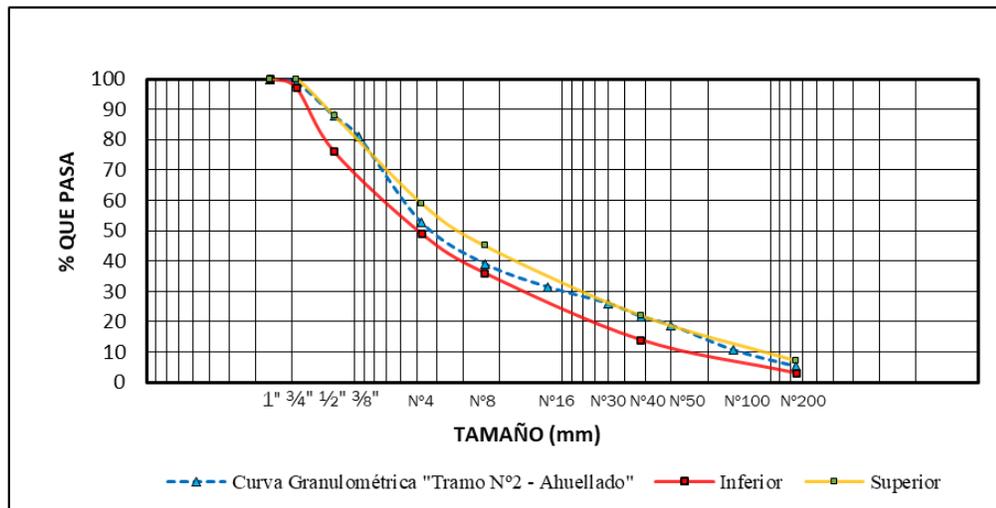
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.21: Granulometría tramo N°2 - Ahuellado**

Peso total (g)			1224,00				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf.	Sup.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	14,06	14,06	1,15	<b>98,85</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	135,08	149,14	12,18	<b>87,82</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	84,16	233,29	19,06	<b>80,94</b>	-	-
N°4	4,75	345,60	578,89	47,30	<b>52,70</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	167,02	745,91	60,94	<b>39,06</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	93,26	839,17	68,56	<b>31,44</b>	-	-
N°30	0,60	67,07	906,24	74,04	<b>25,96</b>	-	-
N°40	0,42	52,15	958,39	78,30	<b>21,70</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	35,44	993,84	81,20	<b>18,80</b>	-	-
N°100	0,15	100,76	1094,60	89,43	<b>10,57</b>	-	-
N°200	0,075	66,17	1160,77	94,83	<b>5,17</b>	3,00	7,00
BASE	-	63,24	1224,00	100,00	<b>0,00</b>	-	-
Suma		1224,00					
Pérdidas		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.2: Curva granulométrica tramo N°2 - Ahuellado**



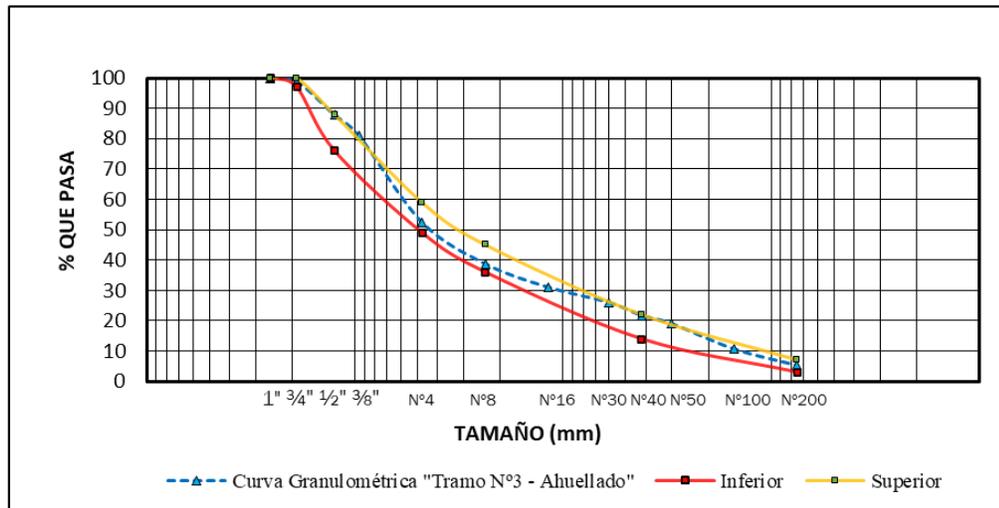
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.22: Granulometría tramo N°3 - Ahuellado**

Peso total (g)			1224,00				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf.	Sup.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	13,68	13,68	1,12	<b>98,88</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	135,07	148,75	12,15	<b>87,85</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	85,03	233,78	19,10	<b>80,90</b>	-	-
N°4	4,75	348,07	581,85	47,54	<b>52,46</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	168,10	749,95	61,27	<b>38,73</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	94,35	844,30	68,98	<b>31,02</b>	-	-
N°30	0,60	61,98	906,28	74,04	<b>25,96</b>	-	-
N°40	0,42	51,62	957,90	78,26	<b>21,74</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	33,70	991,60	81,01	<b>18,99</b>	-	-
N°100	0,15	102,73	1094,33	89,41	<b>10,59</b>	-	-
N°200	0,075	65,95	1160,28	94,79	<b>5,21</b>	3,00	7,00
BASE	-	63,72	1224,00	100,00	<b>0,00</b>	-	-
Suma		1224,00					
Pérdidas		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.3: Curva granulométrica tramo N°3 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

### 3.6.2. Granulometría de núcleos de partes de pavimento no ahuellados

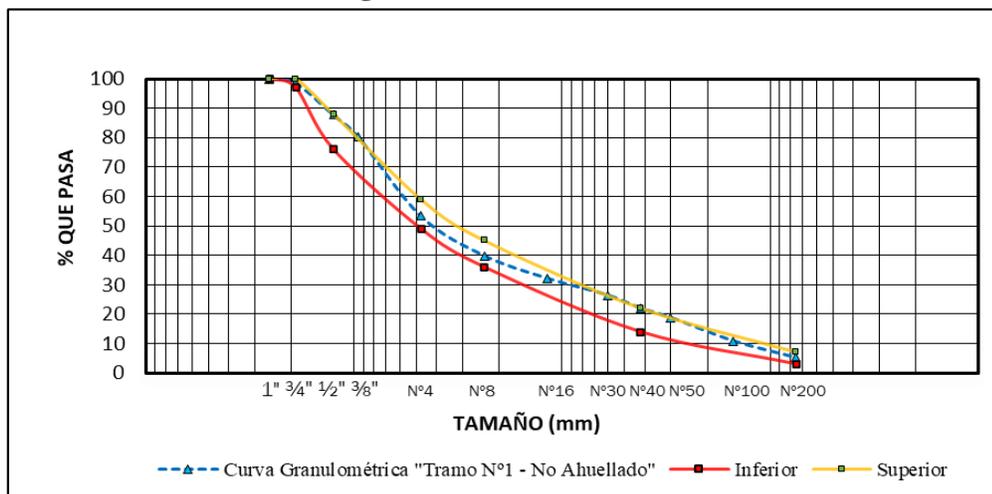
De los resultados del análisis granulométrico de los núcleos extraídos de partes en buenas condiciones sin presencia de ahuellamiento de cada uno de los tres tramos evaluados de pavimento flexible, se tiene que la gradación de los agregados de las curvas granulométricas promedios de cada tramo se ajustan a la faja granulométrica C, según normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras.

**Tabla 3.23: Granulometría tramo N°1 – No ahuellado**

Peso total (g)			1226,07				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf.	Sup.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	17,23	17,23	1,41	<b>98,59</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	133,02	150,25	12,25	<b>87,75</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	90,77	241,02	19,66	<b>80,34</b>	-	-
N°4	4,75	331,38	572,40	46,69	<b>53,31</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	164,72	737,12	60,12	<b>39,88</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	93,72	830,83	67,76	<b>32,24</b>	-	-
N°30	0,60	70,95	901,78	73,55	<b>26,45</b>	-	-
N°40	0,42	53,37	955,15	77,90	<b>22,10</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	39,75	994,90	81,15	<b>18,85</b>	-	-
N°100	0,15	97,58	1092,48	89,10	<b>10,90</b>	-	-
N°200	0,075	69,78	1162,27	94,80	<b>5,20</b>	3,00	7,00
BASE	-	63,80	1226,07	100,00	<b>0,00</b>	-	-
Suma		1226,07					
Pérdidas		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.4: Curva granulométrica tramo N°1 - No ahuellado**



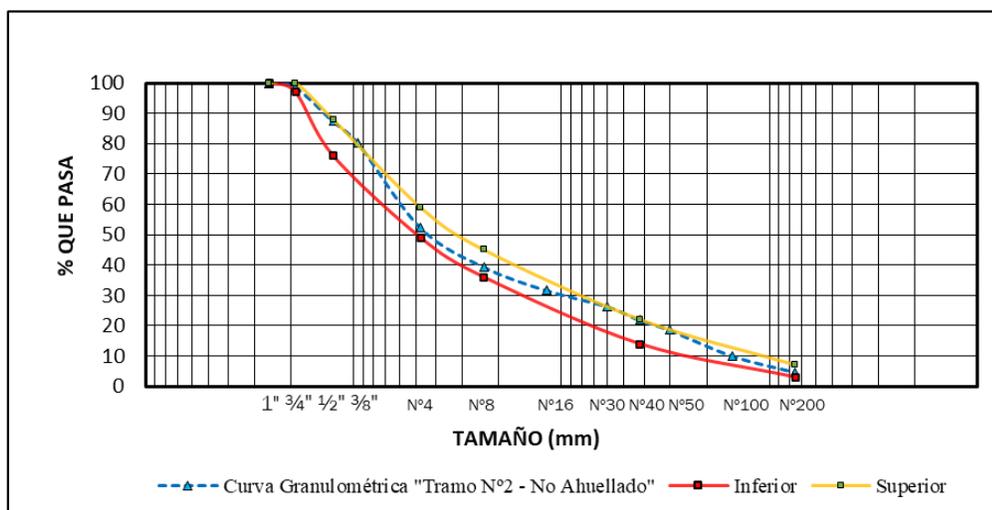
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.24: Granulometría tramo N°2 - No ahuellado**

Peso total (g)		1226,70					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf.	Sup.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	17,20	17,20	1,40	<b>98,60</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	136,93	154,13	12,56	<b>87,44</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	87,60	241,73	19,71	<b>80,29</b>	-	-
N°4	4,75	342,55	584,28	47,63	<b>52,37</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	158,82	743,10	60,58	<b>39,42</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	94,45	837,55	68,28	<b>31,72</b>	-	-
N°30	0,60	65,37	902,92	73,61	<b>26,39</b>	-	-
N°40	0,42	55,13	958,05	78,10	<b>21,90</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	40,82	998,87	81,43	<b>18,57</b>	-	-
N°100	0,15	104,20	1103,07	89,92	<b>10,08</b>	-	-
N°200	0,075	65,37	1168,43	95,25	<b>4,75</b>	3,00	7,00
BASE	-	58,27	1226,70	100,00	<b>0,00</b>	-	-
Suma		1226,70					
Pérdidas		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.5: Curva granulométrica tramo N°2 - No ahuellado**



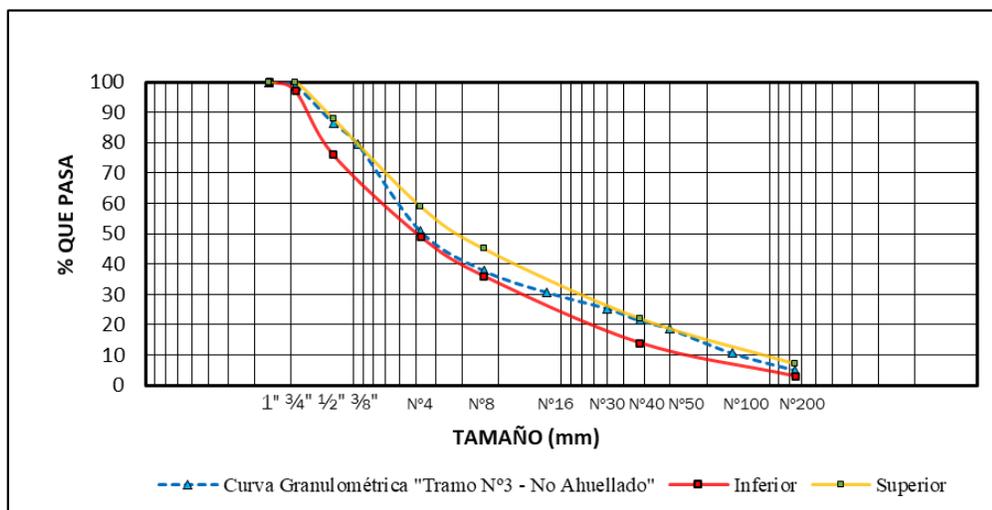
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.25: Granulometría tramo N°3 - No ahuellado**

Peso total (g)		1225,63					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que pasa del total	Faja granulométrica C	
						Inf.	Sup.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/4"	19,00	15,15	15,15	1,24	<b>98,76</b>	97,00	100,00
1/2"	12,50	149,03	164,18	13,40	<b>86,60</b>	76,00	88,00
3/8"	9,50	86,73	250,90	20,47	<b>79,53</b>	-	-
N°4	4,75	350,58	601,48	49,07	<b>50,93</b>	49,00	59,00
N°8	2,36	159,15	760,63	62,06	<b>37,94</b>	36,00	45,00
N°16	1,18	87,25	847,88	69,18	<b>30,82</b>	-	-
N°30	0,60	66,83	914,70	74,63	<b>25,37</b>	-	-
N°40	0,42	48,00	962,70	78,55	<b>21,45</b>	14,00	22,00
N°50	0,30	33,93	996,63	81,32	<b>18,68</b>	-	-
N°100	0,15	98,38	1095,00	89,34	<b>10,66</b>	-	-
N°200	0,075	68,13	1163,13	94,90	<b>5,10</b>	3,00	7,00
BASE	-	62,50	1225,63	100,00	<b>0,00</b>	-	-
Suma		1225,63					
Pérdidas		0,00					

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.6: Curva granulométrica tramo N°3 - No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

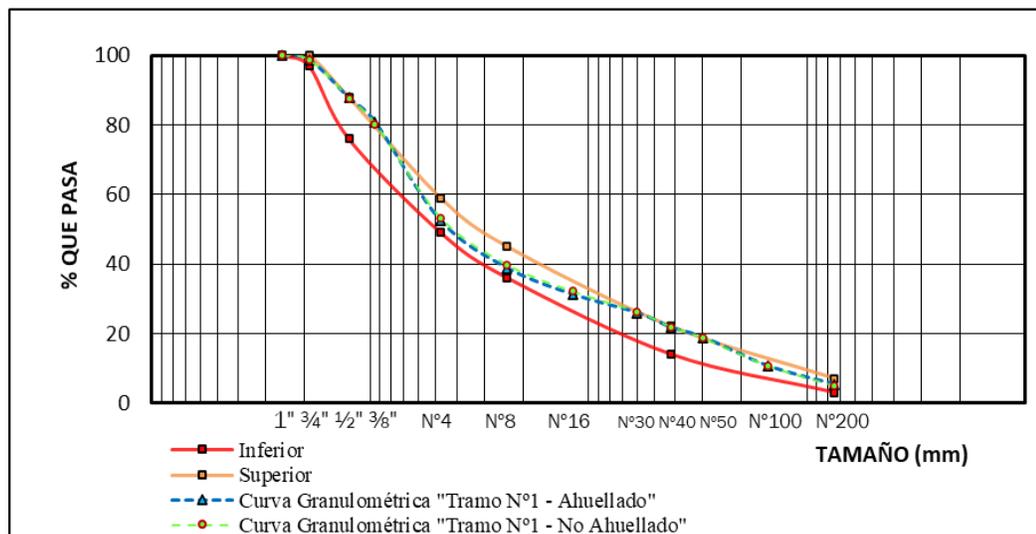
### 3.6.3. Gráficas granulométricas de tramos ahuellados y no ahuellados

**Tabla 3.26: Granulometría tramo N°1 (ahuellado vs. no ahuellado)**

Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total		Faja granulométrica C	
		Tramo N°1 ahuellado	Tramo N°1 no ahuellado	Inf.	Sup.
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	98,76	98,59	97,00	100,00
1/2"	12,50	87,77	87,72	76,00	88,00
3/8"	9,50	80,90	80,31	-	-
N°4	4,75	52,38	53,24	49,00	59,00
N°8	2,36	38,78	39,78	36,00	45,00
N°16	1,18	31,17	32,12	-	-
N°30	0,60	25,92	26,32	-	-
N°40	0,42	21,69	21,96	14,00	22,00
N°50	0,30	18,85	18,72	-	-
N°100	0,15	10,54	10,74	-	-
N°200	0,075	5,31	5,04	3,00	7,00
BASE	-	0,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.7: Curva granulométrica tramo N°1 (ahuellado vs. no ahuellado)**



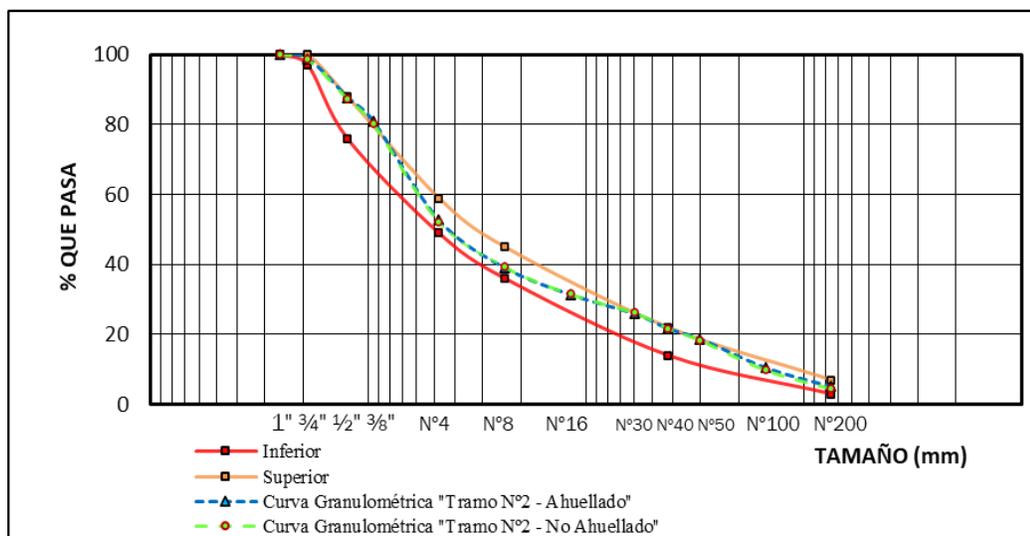
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.27: Granulometría tramo N°2 (ahuellado vs. no ahuellado)**

Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total		Faja granulométrica C	
		Tramo N°2 ahuellado	Tramo N°2 no ahuellado	Inf.	Sup.
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	98,85	98,59	97,00	100,00
1/2"	12,50	87,82	87,41	76,00	88,00
3/8"	9,50	80,94	80,25	-	-
N°4	4,75	52,70	52,26	49,00	59,00
N°8	2,36	39,06	39,29	36,00	45,00
N°16	1,18	31,44	31,57	-	-
N°30	0,60	25,96	26,23	-	-
N°40	0,42	21,70	21,73	14,00	22,00
N°50	0,30	18,80	18,39	-	-
N°100	0,15	10,57	9,88	-	-
N°200	0,075	5,17	4,54	3,00	7,00
BASE	-	0,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.8: Curva granulométrica tramo N°2 (ahuellado vs. no ahuellado)**



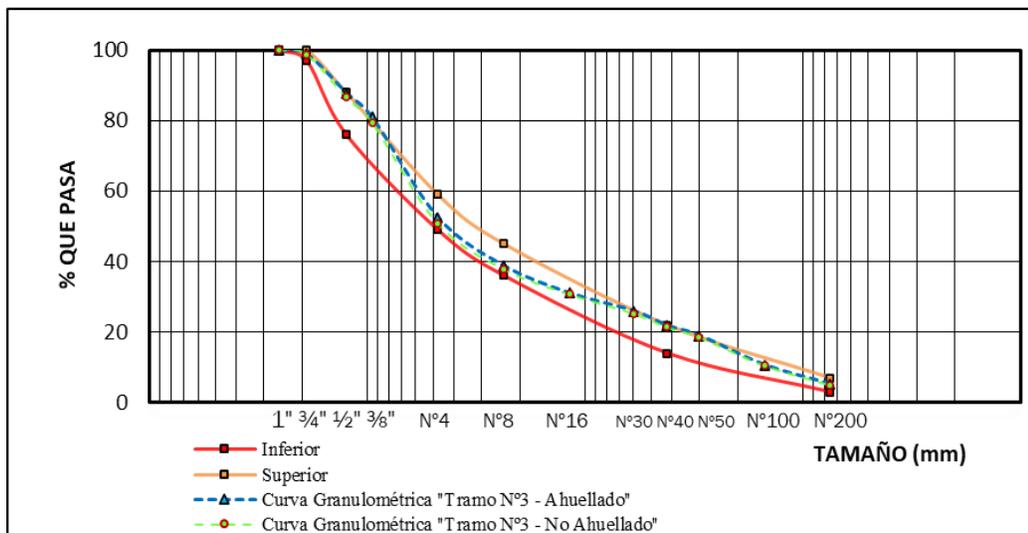
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.28: Granulometría tramo N°3 (ahuellado vs. no ahuellado)**

Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total		Faja granulométrica C	
		Tramo N°3 ahuellado	Tramo N°3 no ahuellado	Inf.	Sup.
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	98,88	98,76	97,00	100,00
1/2"	12,50	87,85	86,59	76,00	88,00
3/8"	9,50	80,90	79,50	-	-
N°4	4,75	52,46	50,86	49,00	59,00
N°8	2,36	38,73	37,86	36,00	45,00
N°16	1,18	31,02	30,73	-	-
N°30	0,60	25,96	25,27	-	-
N°40	0,42	21,74	21,35	14,00	22,00
N°50	0,30	18,99	18,58	-	-
N°100	0,15	10,59	10,54	-	-
N°200	0,075	5,21	4,97	3,00	7,00
BASE	-	0,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.9: Curva granulométrica tramo N°3 (ahuellado vs. no ahuellado)**



Fuente: Elaboración propia

## **3.7. APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X (TC-RX)**

### **3.7.1. Manual guía de utilización del tomógrafo para evaluación de núcleos de capa asfáltica**

#### **3.7.1.1. Introducción**

El término “tomografía computarizada”, o TC, se refiere a un procedimiento computarizado de imágenes por rayos-x en el que se proyecta un haz angosto de rayos-x a un paciente y se gira rápidamente alrededor del cuerpo, produciendo señales que son procesadas por la computadora de la máquina para generar imágenes transversales o “cortes” del cuerpo. Estos cortes se llaman imágenes tomográficas y contienen información más detallada que los rayos-x convencionales.

A diferencia de una radiografía convencional que utiliza un tubo fijo de rayos-x, un escáner de TC utiliza una fuente motorizada de rayos-x que gira alrededor de una abertura circular de una estructura en forma de dona llamada gantry. Durante un escaneo por TC, el paciente permanece recostado en una cama que se mueve lentamente a través del gantry, mientras que el tubo de rayos-x gira alrededor del paciente, disparando haces angostos de rayos-x a través del cuerpo. En lugar de una película, los escáneres de TC utilizan detectores digitales especiales de rayos-x, localizados directamente al lado opuesto de la fuente de rayos-x. Cuando los rayos-x salen del paciente, son captados por los detectores y transmiten a una computadora.

Cada vez que la fuente de rayos-x completa toda una rotación, la computadora de TC utiliza técnicas matemáticas mejoradas para construir un corte de imagen 2D del paciente. El grosor del tejido representado en cada corte de imagen puede variar dependiendo de la máquina de TC utilizada, pero por lo general varía de 1 a 10 milímetros. Cuando se completa todo un corte, se almacena la imagen y la cama motorizada se mueve incrementalmente hacia adelante en el gantry.

### 3.7.1.2. Especificaciones del tomógrafo utilizado

El tomógrafo que se utilizó para la toma de rayos-x se trata de un tomógrafo helicoidal o multicorte, de alta resolución marca Toshiba Aquilion 16, de imagen multiplanar de tipo (axial, sagital, coronal), de cuarta generación, con un diámetro de gantry de 78 cm, que posee detectores ubicados en forma de abanico formando un sistema tubo-detectores, formando un arco móvil y una rotación continua alrededor de la mesa del objeto.

Determinando una resolución convencional en un equipo helicoidal podemos realizar cortes o rebanadas cada 0.5 mm sin contraste en la sección; con alta resolución podemos obtener secciones desde los 0.5 mm, pero con contraste, es decir que se observan partículas más a detalle, pudiendo definir las capas blandas de los vasos sanguíneos para tener una idea de la claridad de la imagen.

Este equipo tiene un barrido de 360° debido a que los detectores están ubicados dentro del arco de observación.

**Figura 3.14: Tomógrafo Toshiba Aquilion 16**



**Fuente:** Rayos X-CER Tomografía, Tarija

### 3.7.1.3. Tipo de muestra para tomografía computarizada de rayos-x

Las muestras que se llevarán para la toma de rayos-x, son núcleos extraídos de capa asfáltica con y sin ahuellamiento, con diámetros de 10 cm y alturas promedio que están comprendidas entre 5 y 7 cm.

Se tendrá el debido cuidado en el transporte de las muestras para evitar que sufra algún tipo de daño antes de realizar el proceso tomográfico.

### 3.7.1.4. Colocación de la muestra en el tomógrafo

Las muestras de núcleos de capa asfáltica serán colocadas una por vez para realizar el procedimiento tomográfico, se pondrá y centrará cada muestra en la mesa o camilla de soporte, en la parte de debajo de la abertura o ventana circular del gantry.

Al finalizar la colocación de la muestra se procederá a definir los parámetros más importantes de la exploración de los núcleos por parte del operador del tomógrafo, estos ajustes se los realiza en la consola de control, lugar de donde se dirige el funcionamiento del equipo.

**Figura 3.15: Colocado de muestra en el tomógrafo**



**Fuente:** Rayos X-CER Tomografía, Tarija

**Figura 3.16: Consola de control**



**Fuente:** Rayos X-CER Tomografía, Tarija

### **3.7.1.5. Intensidad del haz de rayos-x y el tiempo de exposición**

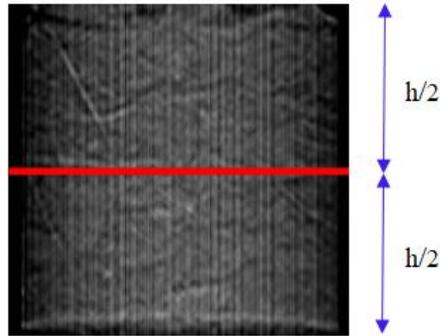
La exploración con TC implica el uso de rayos-x, los cuales son una forma de radiación ionizante. La radiación ionizante es cualquiera de los varios tipos de partículas y rayos emitidos por material radiactivo, equipos de alto voltaje, reacciones nucleares y las estrellas. Los tipos que son generalmente importantes para su salud son las partículas alfa y beta, los rayos-x y los rayos gama.

La intensidad del haz de rayos-x se define como el número de fotones de rayos-x en el haz útil multiplicado por la energía de cada fotón. Un haz de rayos-x de mayor calidad es un haz de mayor energía y por lo tanto con más probabilidades de penetrar la anatomía de interés, este aspecto está relacionado con el kilovoltaje (kV).

Los sistemas de rayos-x empleados en el análisis de mezclas asfálticas son similares a los utilizados en el ámbito médico. Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-x y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución.

Primeramente, se obtiene el topograma del núcleo que está siendo evaluado en el tomógrafo, el cual es una imagen obtenida al inicio de una exploración sobre la que se programa el resto de la misma en función de las zonas de interés y la orientación de los cortes deseados.

En el proyecto se determinó obtener una imagen transversal de la parte central de cada núcleo de capa asfáltica extraído.



Los parámetros de la intensidad de rayos-x y el tiempo de exposición para obtener una rebanada de corte transversal del centro de cada muestra de núcleo de capa asfáltica durante la exploración de tomografía fueron:

- 120 kilovoltios (kV)
- 10 segundos (s)

### **3.7.1.6. Resolución de las imágenes obtenidas por tomografía**

Terminada la exploración tomográfica, las imágenes obtenidas son proporcionadas en el programa por defecto del tomógrafo, el cual es el eFilm Lite 4.1 formato DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine), eFilm Lite es una aplicación utilizada para la visualización y manipulación de imágenes médicas.

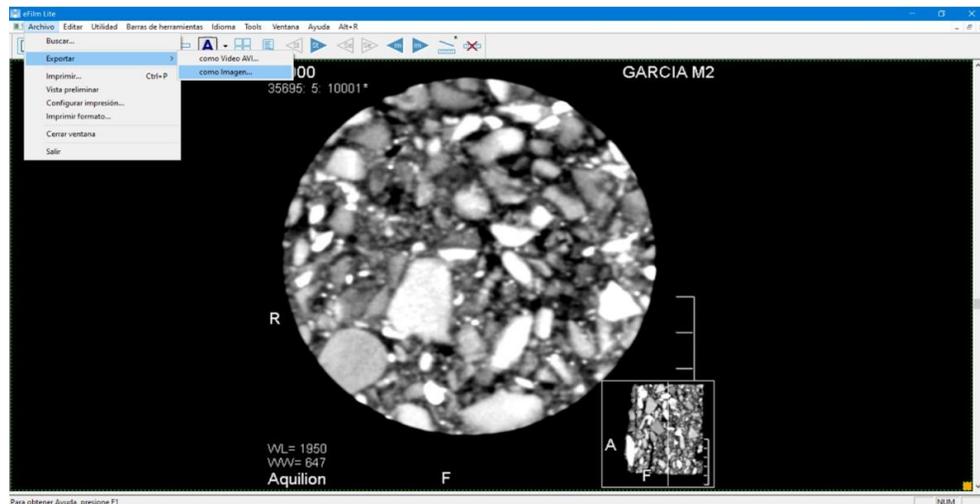
Las proyecciones tomadas por cada detector durante el barrido son utilizadas para la reconstrucción de la imagen mediante un proceso denominado retroproyección filtrada. La retroproyección implica la reasignación de los datos del barrido a una matriz de imagen bidimensional que va a representar la sección de la muestra que se está explorando. La retroproyección permite asignar una densidad exacta a cada uno de estos píxeles.

A partir de la aplicación de esta tecnología se logra obtener imágenes bidimensionales monocromáticas, las cuales son imágenes compuestas por una cantidad determinada de píxeles en escalas de grises que varían en un rango de 0 (color negro) a 255 (color blanco).

Las imágenes resultantes tienen una resolución de 520 x 520 píxeles.

Posteriormente el archivo de imágenes monocromáticas se exportarán desde el programa eFilm Lite para realizar el análisis de vacíos y de contacto agregado-agregado correspondientes, mediante el software de procesamiento de imágenes digitales denominado ImageJ, el cual es un programa basado en programación Java.

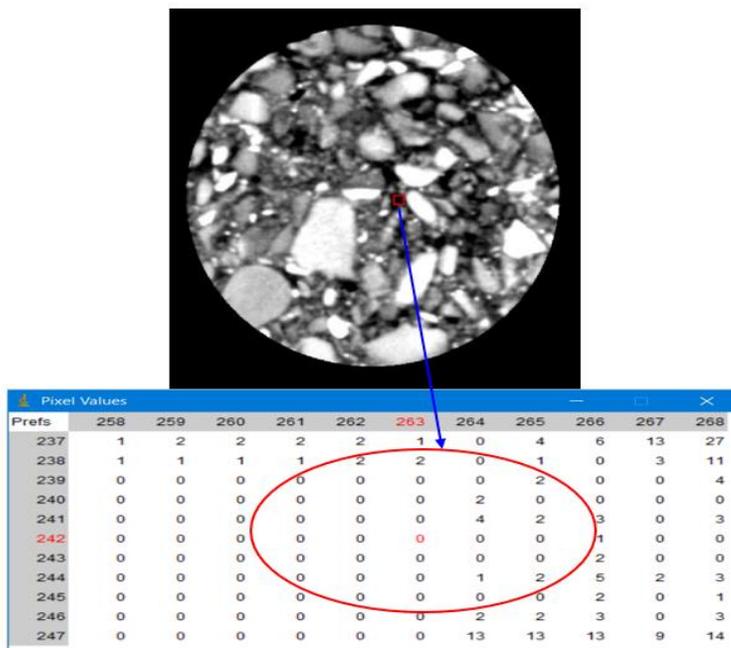
**Figura 3.17: Estructura interna de núcleo asfáltico en eFilm Lite**



**Fuente:** Elaboración propia

Al importar las imágenes obtenidas con el tomógrafo al software ImageJ, estas se transforman en imágenes codificadas; según su composición de píxeles. El programa identifica cada pixel de la imagen por la densidad de los componentes presentes, asignando el código de 0 a píxeles cuyo valor numérico es 0 hasta el código de 255 según la densidad del objeto presente.

**Figura 3.18: Valor de pixel en ImageJ**



Fuente: Elaboración propia

### **3.8. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DIGITALIZADAS OBTENIDAS POR TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X**

#### **3.8.1. Análisis de porcentaje de vacíos**

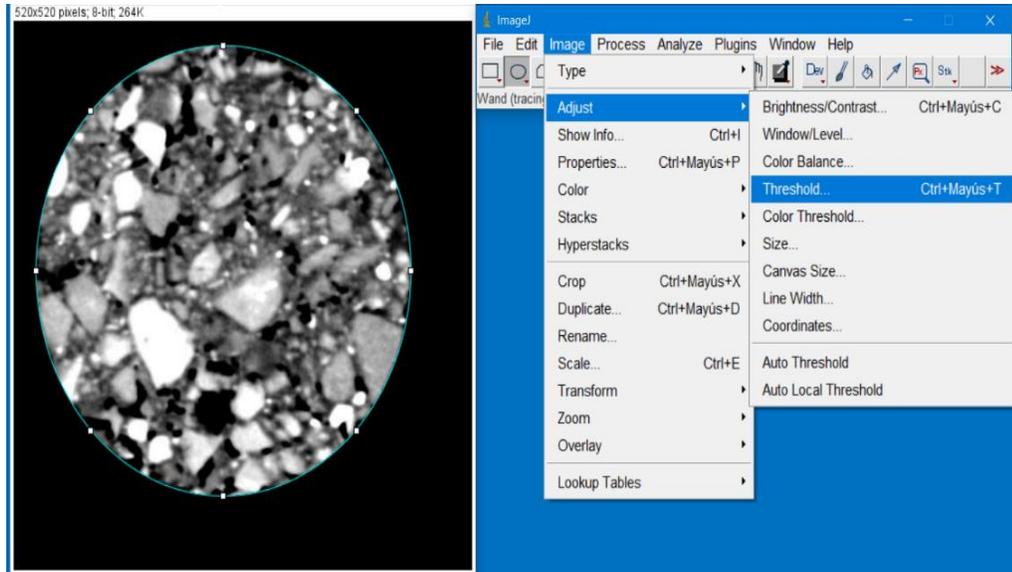
Para realizar el análisis de vacíos en las imágenes digitales de las muestras de núcleos de pavimentos flexibles obtenidas con TC-RX, se procede a exportar las imágenes computarizadas desde el programa que por defecto contiene el tomógrafo para la visualización de las imágenes de los estudios denominado eFilm Lite al software ImageJ.

ImageJ las analiza como imágenes binarias, lo que significa que cada imagen conservará solo dos códigos en su matriz de colores de píxeles, el valor 0 identificado por el color negro (vacíos) y 255 identificado por el color blanco (agregados), es decir, se hace una transformación de una imagen monocromática (imagen en escala de grises) a una imagen binaria (imagen en blanco y negro).

El aire es el elemento más liviano dentro de todos los componentes de la mezcla, el programa procede a darle al pixel que es ocupado por aire, un código con el valor de 0 de

color negro para los vacíos y para los agregados que tienen más densidad el valor de 255 con el color blanco.

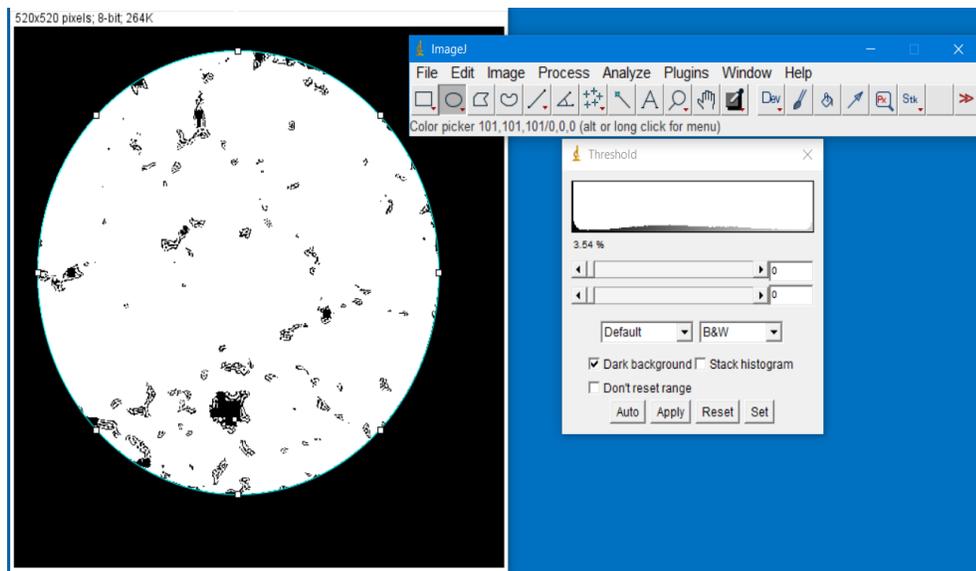
**Figura 3.19: Ajustes de imagen en ImageJ**



Fuente: Elaboración propia

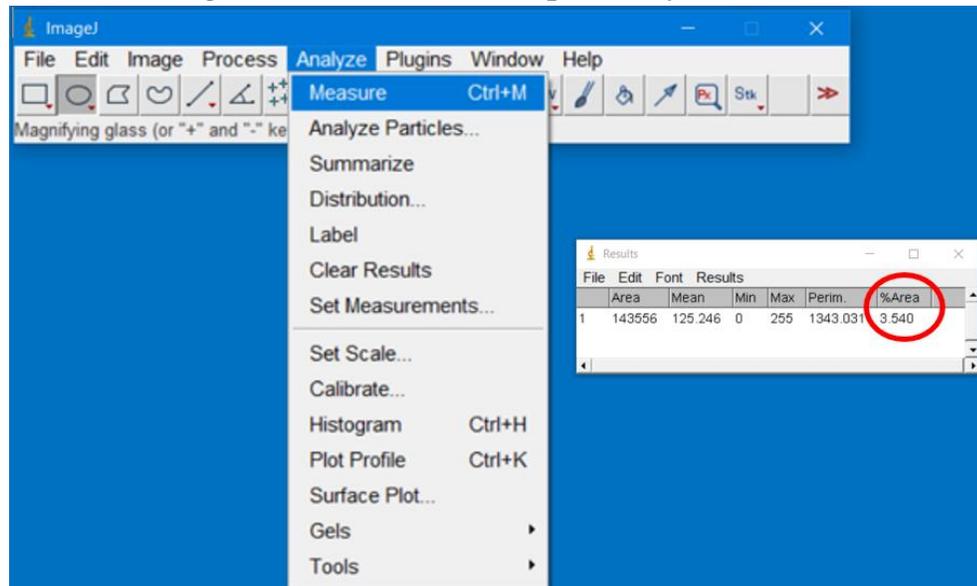
El programa proporciona una imagen en la que muestra la distribución de vacíos de la mezcla, donde mide el área en porcentaje ocupada por los vacíos que se presentan en la mezcla asfáltica, considerando únicamente a los vacíos y excluyendo a los agregados.

**Figura 3.20: Visualización de vacíos**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.21: Obtención del porcentaje de vacíos**



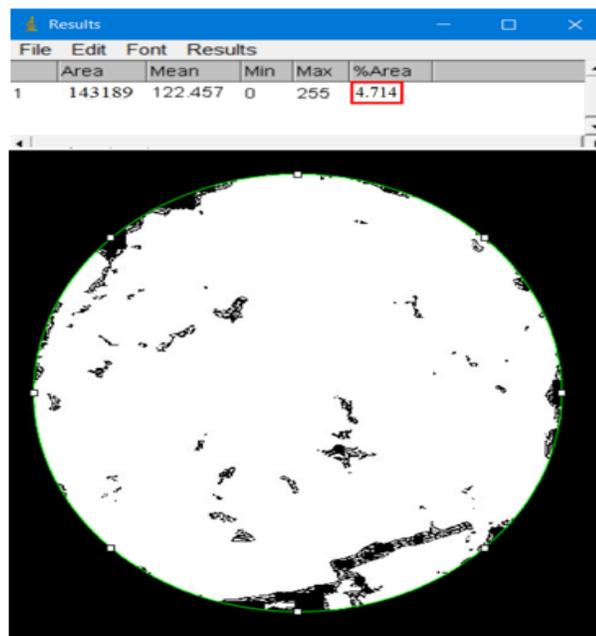
Fuente: Elaboración propia

### 3.8.1.1. Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Figura 3.22: Porcentaje de vacíos**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.29: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	143189,000	136439,000	6750,000	4,714
2	1	144220,000	138441,000	5779,000	4,007
3	1	143556,000	137385,000	6171,000	4,299
4	1	143879,000	136984,000	6895,000	4,792
5	1	144754,000	140039,000	4715,000	3,257
6	1	145120,000	140495,000	4625,000	3,187
7	1	143192,000	136279,000	6913,000	4,828
8	1	143189,000	136608,000	6581,000	4,596
9	1	143192,000	138422,000	4770,000	3,331
10	1	144218,000	139561,000	4657,000	3,229
11	1	144752,000	140104,000	4648,000	3,211
12	1	144855,000	140224,000	4631,000	3,197
13	1	144389,000	139618,000	4771,000	3,304
14	1	144723,000	140070,000	4653,000	3,215
15	1	144527,000	139802,000	4725,000	3,269
16	1	143987,000	139348,000	4639,000	3,222
<b>Media</b>					<b>3,729</b>
<b>Máximo</b>					<b>4,828</b>
<b>Mínimo</b>					<b>3,187</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,676</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,181</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La figura 3.22 es el resultado del procesamiento de la imagen de un núcleo extraído de pavimento flexible obtenida a través de tomografía computarizada de rayos-x, visualizándose en dicha imagen la distribución y porcentaje de vacíos, el procedimiento se repite para las demás muestras de núcleos de este tramo y de la misma manera para los núcleos de los otros tramos. Para ver las restantes imágenes de los núcleos con vacíos (**ver anexo 1 y 2**).

La tabla 3.29 muestra el análisis de vacíos realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°1 que presentan ahuellamiento, son 16 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de porcentaje de vacíos en cada núcleo de ahuellamiento. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.30: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	144900,000	139842,000	5058,000	3,491
2	1	145232,000	140579,000	4653,000	3,204
3	1	145231,000	139690,000	5541,000	3,815
4	1	145889,000	140371,000	5518,000	3,782
5	1	145231,000	139932,000	5299,000	3,649
6	1	145564,000	140001,000	5563,000	3,822
7	1	144900,000	140283,000	4617,000	3,186
8	1	144900,000	140144,000	4756,000	3,282
9	1	144656,000	139910,000	4746,000	3,281
10	1	144008,000	139380,000	4628,000	3,214
11	1	144855,000	140063,000	4792,000	3,308
12	1	145112,000	140345,000	4767,000	3,285
13	1	144789,000	140047,000	4742,000	3,275
14	1	144973,000	140161,000	4812,000	3,319
<b>Media</b>					<b>3,422</b>
<b>Máximo</b>					<b>3,822</b>
<b>Mínimo</b>					<b>3,186</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,240</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,070</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La tabla 3.30 como ya lo mencionamos anteriormente muestra el resumen de los porcentajes de vacíos presentes en las muestras de núcleos de ahuellamiento, en este caso de los núcleos del tramo N°2, son 14 núcleos evaluados para este tramo. Se presenta igual el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.31: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	144581,000	139506,000	5075,000	3,510
2	1	143868,000	138651,000	5217,000	3,626
3	1	143556,000	139038,000	4518,000	3,147
4	1	143189,000	138487,000	4702,000	3,284
5	1	144715,000	139740,000	4975,000	3,438
6	1	143767,000	138653,000	5114,000	3,604
<b>Media</b>					<b>3,435</b>
<b>Máximo</b>					<b>3,626</b>
<b>Mínimo</b>					<b>3,147</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,188</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,055</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.31 como se mencionó anteriormente muestra el resumen de los porcentajes de vacíos presentes en las muestras de núcleos de ahuellamiento, en este caso de los núcleos del tramo N°3 que son 6 núcleos evaluados. Se presenta igual el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

### 3.8.1.2. Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.32: Porcentaje de vacíos tramo N°1 – No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	144720,000	137701,000	7019,000	4,850
2	1	144330,000	137461,000	6869,000	4,759
3	1	143248,000	136565,000	6683,000	4,665
4	1	144011,000	137326,000	6685,000	4,642
5	1	145099,000	138153,000	6946,000	4,787
6	1	144862,000	137983,000	6879,000	4,749
<b>Media</b>					<b>4,742</b>
<b>Máximo</b>					<b>4,850</b>
<b>Mínimo</b>					<b>4,642</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,077</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,016</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.32 muestra el análisis de vacíos realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°1 que no están afectados por ahuellamiento, son 6 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de porcentaje de vacíos en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.33: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	144525,000	137615,000	6910,000	4,781
2	1	144368,000	137561,000	6807,000	4,715
3	1	143655,000	136998,000	6657,000	4,634
4	1	144786,000	137990,000	6796,000	4,694
5	1	145127,000	138236,000	6891,000	4,748
6	1	144779,000	137937,000	6842,000	4,726
<b>Media</b>					<b>4,716</b>
<b>Máximo</b>					<b>4,781</b>
<b>Mínimo</b>					<b>4,634</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,050</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,011</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La tabla 3.33 muestra el análisis de vacíos realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°2 que no están afectados por ahuellamiento, son 6 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de porcentaje de vacíos en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.34: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de pixeles llenos	N° de pixeles vacíos	% vacíos
1	1	144564,000	137754,000	6810,000	4,711
2	1	144361,000	137650,000	6711,000	4,649
3	1	143862,000	137349,000	6513,000	4,527
4	1	144352,000	137680,000	6672,000	4,622
<b>Media</b>					<b>4,627</b>
<b>Máximo</b>					<b>4,711</b>
<b>Mínimo</b>					<b>4,527</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,077</b>
<b>Coefficiente de variación</b>					<b>0,017</b>

**Fuente:** Elaboración propia

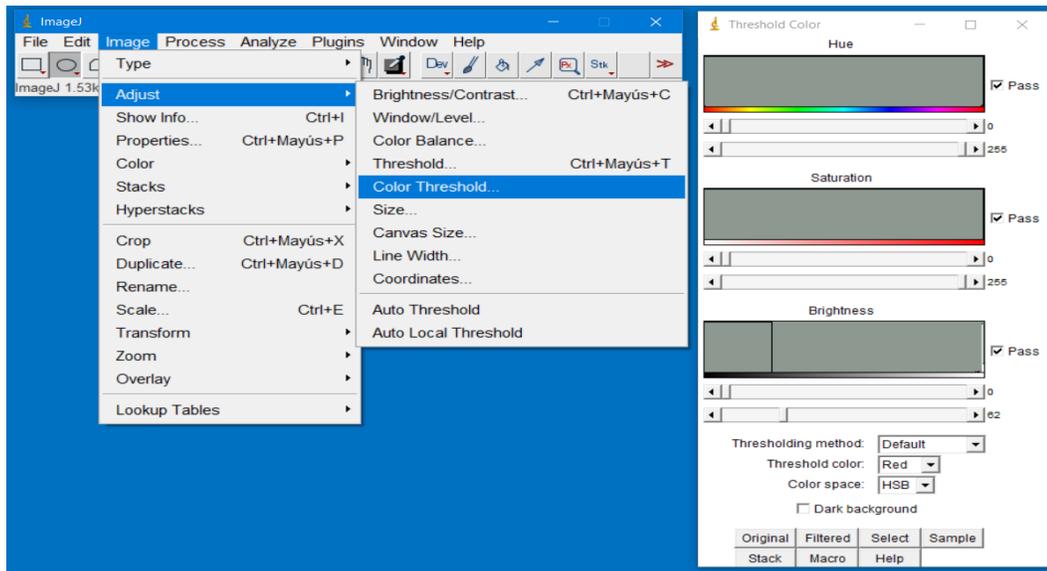
La tabla 3.34 muestra el análisis de vacíos realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°3 que no están afectados por ahuellamiento, son 4 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de porcentaje de vacíos en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de contenido de vacíos, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

### **3.8.2. Análisis de contacto agregado-agregado**

El análisis de los puntos de contacto entre agregados se los realiza mediante conteo visual en cada imagen digitalizada obtenida de la parte central de cada núcleo utilizando filtros dentro del programa ImageJ.

Se procede a aplicar una pigmentación roja a la imagen para visualizar de mejor manera los agregados gruesos, que son las partículas retenidas en la malla N°4 (4,75 mm), para lo cual se identifica el valor de pixel que delimitará los agregados gruesos de los finos. El proceso consiste en aplicar dicho filtro a cada imagen en el programa ImageJ y el valor de 62 es el valor límite de separación de agregados, todas las partículas con un código menor a este valor el programa las pigmentará de color rojo, con este proceso se logra identificar de mejor manera los puntos de contacto entre agregados gruesos.

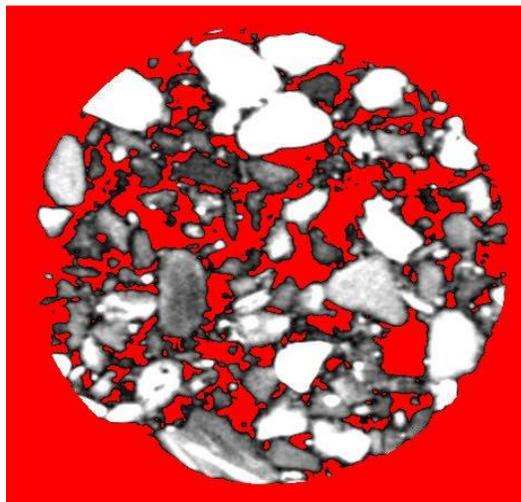
**Figura 3.23: Aplicación de valor límite de pixel**



**Fuente:** Elaboración propia

El valor límite de 62 es recomendado por el autor de método que nos permite validar el dato obtenido, por tanto este es un valor medio de los valores analizados en cada imagen de corte transversal de los núcleos extraídos.

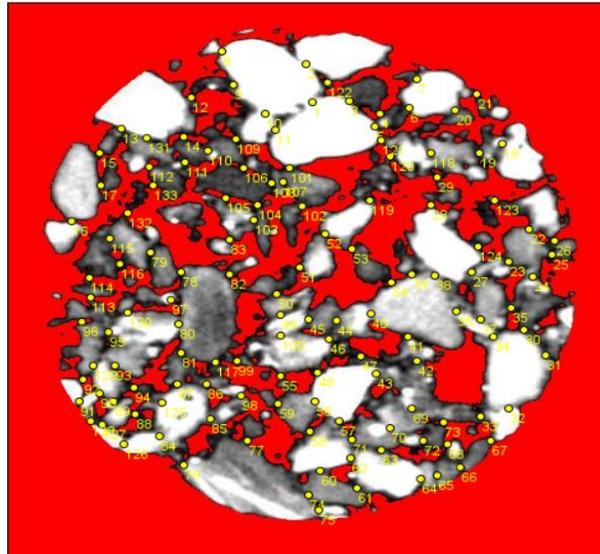
**Figura 3.24: Aplicación de filtro rojo**



**Fuente:** Elaboración propia

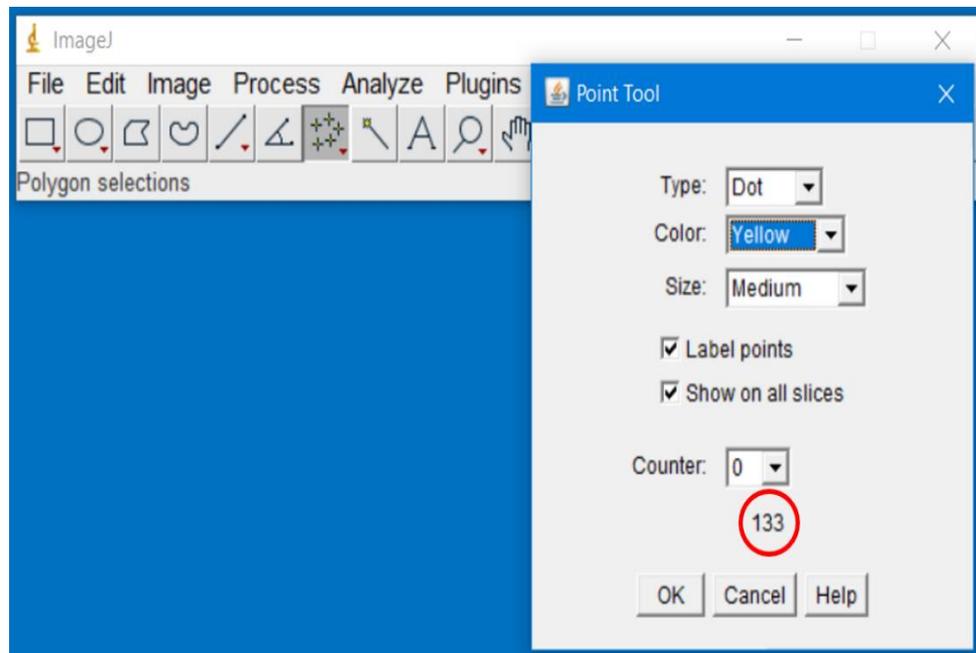
Ya aplicado el pigmento rojo a cada imagen se procede al conteo de los puntos de contacto colocando marcadores donde exista contacto entre agregados y el programa nos va contabilizando la cantidad de puntos.

**Figura 3.25: Puntos de contacto**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.26: Conteo de puntos de contacto**



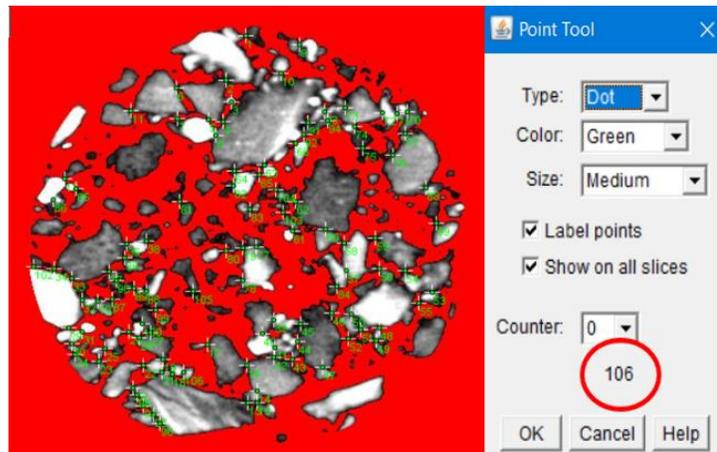
Fuente: Elaboración propia

### 3.8.2.1. Contacto agregado-agregado de núcleos con ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Figura 3.27: Puntos de contacto**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.35: Contacto agregado-agregado tramo N°1 – Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	143189,000	108,000
2	1	144220,000	116,000
3	1	143556,000	111,000
4	1	143879,000	115,000
5	1	144754,000	129,000
6	1	145120,000	127,000
7	1	143192,000	107,000
8	1	143189,000	114,000
9	1	143192,000	124,000
10	1	144218,000	126,000
11	1	144752,000	129,000
12	1	144855,000	130,000
13	1	144389,000	128,000
14	1	144723,000	131,000
15	1	144527,000	129,000
16	1	143987,000	130,000
<b>Media</b>			<b>122,125</b>
<b>Máximo</b>			<b>131,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>107,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>8,671</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>0,071</b>

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.27 es el resultado del procesamiento de la imagen de un núcleo extraído de pavimento flexible obtenida a través de tomografía computarizada de rayos-x,

visualizándose en dicha imagen la cantidad de puntos de contacto de agregado, el procedimiento se repite para las demás muestras de núcleos de este tramo y de la misma manera para los núcleos de los otros tramos. Para ver las restantes imágenes de los núcleos con contacto de agregado (**ver anexo 1 y 2**).

La tabla 3.35 muestra el análisis de contacto agregado-agregado realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°1 que presentan ahuellamiento, donde se aprecia la variación de la cantidad de puntos de contacto de agregados en cada núcleo de ahuellamiento, las muestras evaluadas para este tramo son 16 núcleos. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.36: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	144900,000	122,000
2	1	145232,000	128,000
3	1	145231,000	125,000
4	1	145889,000	127,000
5	1	145231,000	129,000
6	1	145564,000	126,000
7	1	144900,000	130,000
8	1	144900,000	124,000
9	1	144656,000	126,000
10	1	144008,000	125,000
11	1	144855,000	126,000
12	1	145112,000	128,000
13	1	144789,000	129,000
14	1	144973,000	128,000
<b>Media</b>			<b>126,643</b>
<b>Máximo</b>			<b>130,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>122,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>2,205</b>
<b>Coeficiente de variación</b>			<b>0,017</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.36 como ya lo mencionamos anteriormente muestra el resumen de los puntos de contacto de agregado presentes en las muestras de núcleos de ahuellamiento, en este caso de los núcleos del tramo N°2, las muestras evaluadas para este tramo son 14 núcleos. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.37: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - Ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	144581,000	125,000
2	1	143868,000	123,000
3	1	143556,000	127,000
4	1	143189,000	125,000
5	1	144715,000	124,000
6	1	143767,000	123,000
<b>Media</b>			<b>124,500</b>
<b>Máximo</b>			<b>127,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>123,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,517</b>
<b>Coeficiente de variación</b>			<b>0,012</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La tabla 3.37 como se mencionó anteriormente muestra el resumen de los puntos de contacto de agregado presentes en las muestras de núcleos de ahuellamiento, en este caso de los núcleos del tramo N°3, las muestras evaluadas para este último tramo son 6 núcleos. Al igual que en las anteriores tablas también se presenta el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

### 3.8.2.2. Contacto agregado-agregado de núcleos sin ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.38: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	144720,000	108,000
2	1	144330,000	111,000
3	1	143248,000	113,000
4	1	144011,000	114,000
5	1	145099,000	111,000
6	1	144862,000	112,000
<b>Media</b>			<b>111,500</b>
<b>Máximo</b>			<b>114,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>108,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>2,074</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>0,019</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.38 muestra el análisis de contacto agregado-agregado realizado a las imágenes digitalizadas de los 6 núcleos del tramo N°1 que no presentan ahuellamiento, en donde se aprecia la variación de la cantidad de puntos de contacto de agregados en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.39: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	144525,000	111,000
2	1	144368,000	113,000
3	1	143655,000	115,000
4	1	144786,000	112,000
5	1	145127,000	111,000
6	1	144779,000	113,000
<b>Media</b>			<b>112,500</b>
<b>Máximo</b>			<b>115,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>111,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,517</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>0,013</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.39 muestra el análisis de contacto agregado-agregado realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°2 que no presentan ahuellamiento, son 6 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de la cantidad de puntos de contacto de agregados en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Tabla 3.40: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - No ahuellado**

N° de núcleo	N° de corte transversal	N° de pixeles	N° de puntos de contacto agregado - agregado
1	1	144564,000	112,000
2	1	144361,000	114,000
3	1	143862,000	115,000
4	1	144352,000	113,000
<b>Media</b>			<b>113,500</b>
<b>Máximo</b>			<b>115,000</b>
<b>Mínimo</b>			<b>112,000</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,291</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>0,011</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La tabla 3.40 muestra el análisis de contacto agregado-agregado realizado a las imágenes digitalizadas de los núcleos del tramo N°3 que no presentan ahuellamiento, son 4 núcleos evaluados para este tramo, en donde se aprecia la variación de la cantidad de puntos de contacto de agregados en cada núcleo. También se observa el valor medio, máximo y mínimo de los puntos de contacto entre agregados, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

### 3.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después del análisis de las imágenes digitales del interior de los núcleos con y sin ahuellamiento de pavimentos flexibles, obtenidas a través de la técnica de tomografía computarizada de rayos-x, tanto en la determinación del porcentaje de vacíos y el contacto entre agregados presentes en la estructura interna de cada una de las muestras de núcleo asfáltico; se procede a la etapa del análisis e interpretación de los resultados encontrados sobre la evaluación del fenómeno de ahuellamiento en pavimentos flexibles por la metodología TC-RX.

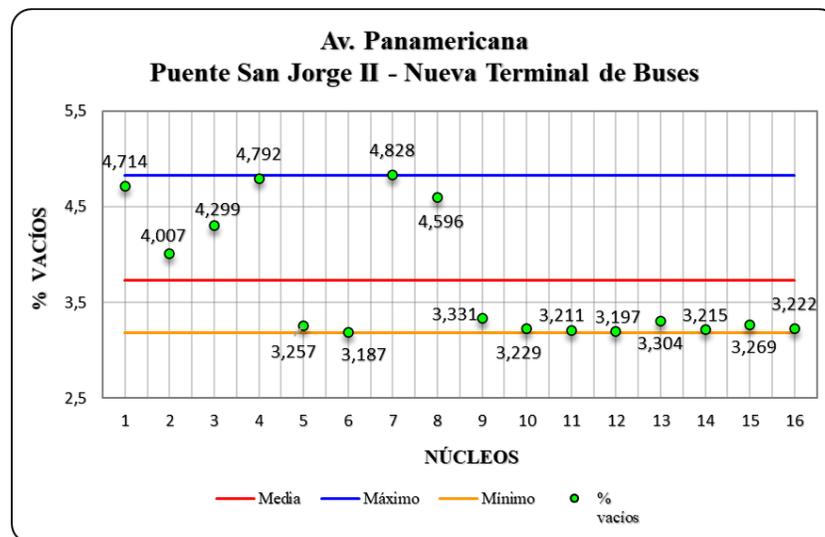
#### 3.9.1. Análisis de núcleos extraídos

##### 3.9.1.1. Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

Área transversal de núcleo: 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.10: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.10 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°1 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una

línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 16 núcleos.

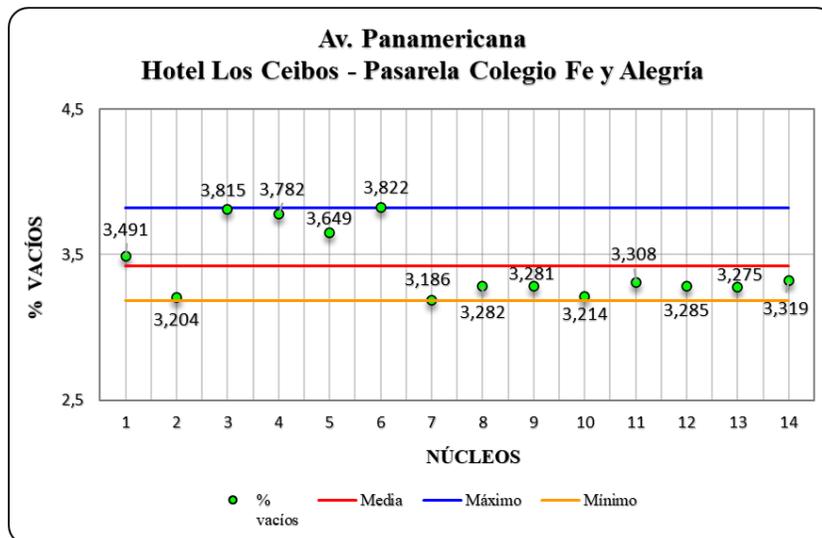
Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el puente de San Jorge II hasta el ingreso a la nueva terminal de buses, se tiene un valor medio de 3,729 % de vacíos, un valor mínimo de 3,187 % y un valor máximo de 4,828 %.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,676 y un coeficiente de variación de 0,181.

De las muestras evaluadas para el porcentaje de vacíos en el tramo N°1, se encuentran entre el valor mínimo de 3,187 % y el valor medio de 3,729 % un total de 10 muestras, entre el valor máximo de 4,828 % y el valor medio de 3,729 % un total de 6 muestras.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.11: Porcentaje de Vacíos Tramo N°2 - Ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.11 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°2 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una

línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 14 núcleos.

Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el Hotel Los Ceibos hasta la pasarela del colegio Fe y Alegría, se tiene un valor medio de 3,422 % de vacíos, un valor mínimo de 3,186 % y un valor máximo de 3,822 %.

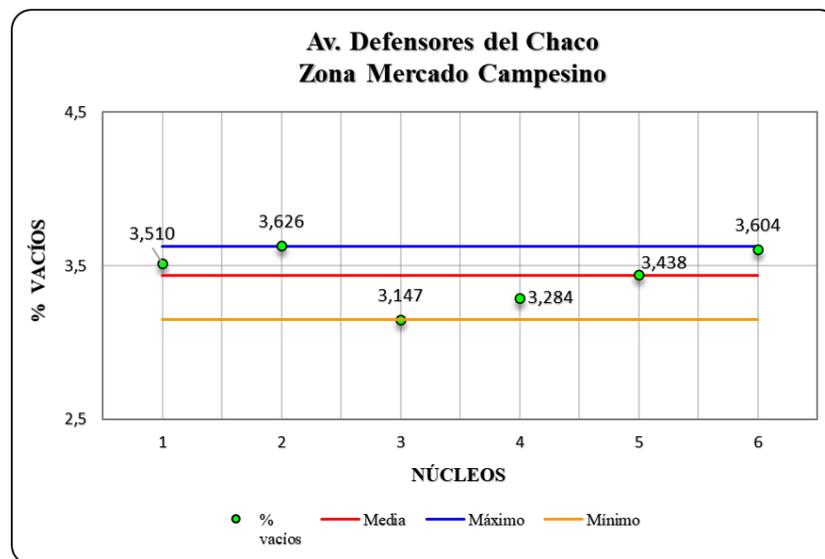
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,240 y un coeficiente de variación de 0,070.

De las muestras evaluadas para el porcentaje de vacíos en el tramo N°2, se encuentran entre el valor mínimo de 3,186 % y el valor medio de 3,422 % un total de 9 muestras, entre el valor máximo de 3,822 % y el valor medio de 3,422 % un total de 5 muestras.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.12: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - Ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.12 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°3 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una

línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Defensores del Chaco que comprende desde la calle Enrique Pantoja hasta la calle Hugo Mealla, se tiene un valor medio de 3,435 % de vacíos, un valor mínimo de 3,147 % y un valor máximo de 3,626 %.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,188 y un coeficiente de variación de 0,055.

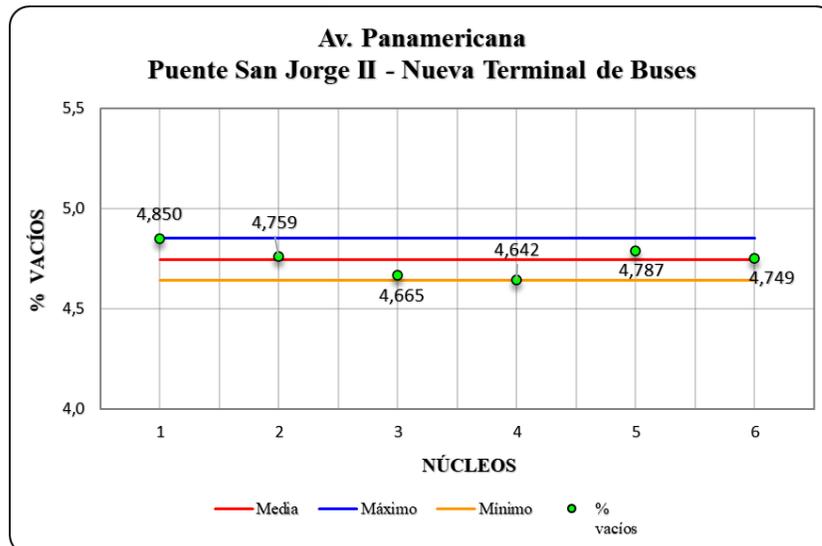
De las muestras evaluadas para el porcentaje de vacíos en el tramo N°3, se encuentran entre el valor mínimo de 3,147 % y el valor medio de 3,435 % un total de 2 muestras, entre el valor máximo de 3,626 % y el valor medio de 3,435 % un total de 4 muestras.

### 3.9.1.2. Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.13: Porcentaje de vacíos tramo N°1 - No ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.13 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°1 que no presentan ahuellamiento,

también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el puente de San Jorge II hasta el ingreso a la nueva terminal de buses, se tiene un valor medio de 4,742 % de vacíos, un valor mínimo de 4,642 % y un valor máximo de 4,850 %.

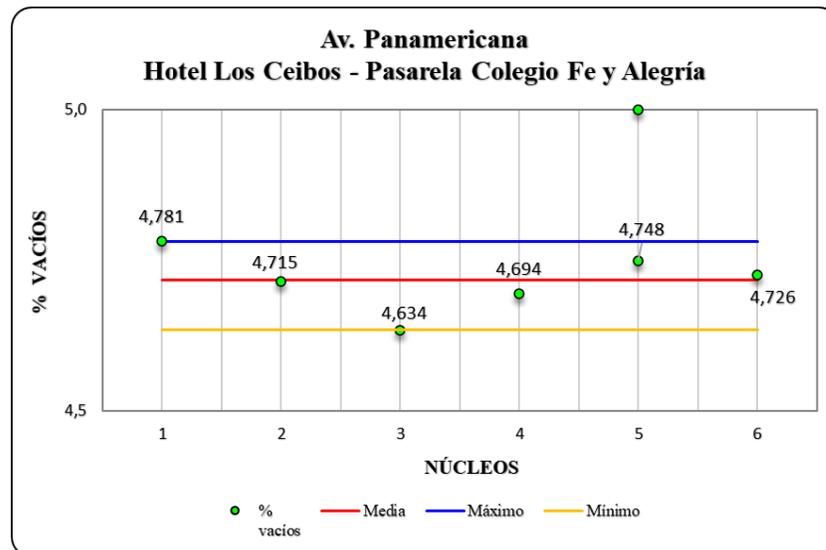
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,077 y un coeficiente de variación de 0,016.

Se encuentran entre el valor mínimo de 4,642 % y el valor medio de 4,742 % un total de 2 muestras, entre el valor máximo de 4,850 % y el valor medio de 4,742 % un total de 4 muestras.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.14: Porcentaje de vacíos tramo N°2 - No ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.14 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°2 que no presentan ahuellamiento,

también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el Hotel Los Ceibos hasta la pasarela del colegio Fe y Alegría, se tiene un valor medio de 4,716 % de vacíos, un valor mínimo de 4,634 % y un valor máximo de 4,781 %.

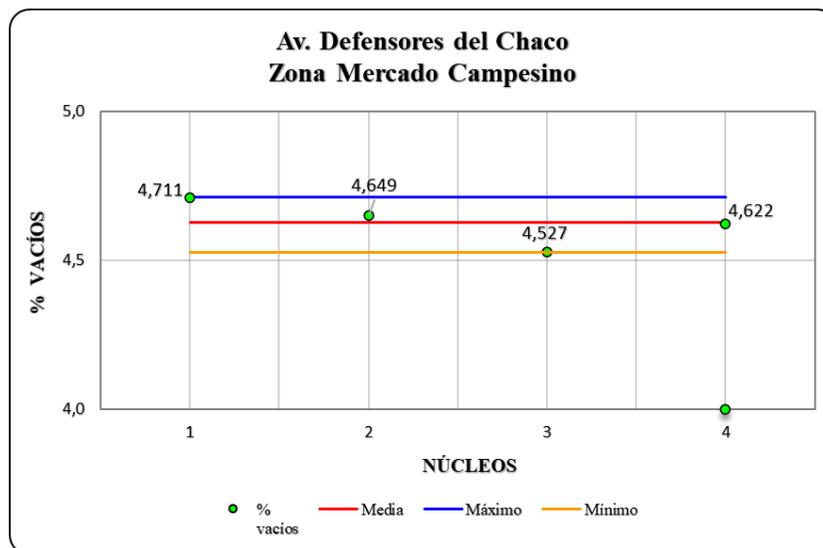
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,050 y un coeficiente de variación de 0,011.

Se encuentran entre el valor mínimo de 4,634 % y el valor medio de 4,716 % un total de 3 muestras, entre el valor máximo de 4,781 % y el valor medio de 4,716 % un total de 3 muestras.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.15: Porcentaje de vacíos tramo N°3 - No ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.15 se observa la distribución de los valores de porcentaje de vacíos pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°3 que no presentan ahuellamiento,

también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los porcentajes de vacíos. Para este tramo son evaluados 4 núcleos.

Como resultado del análisis del % de vacíos de las muestras de núcleos asfálticos obtenidos del tramo de la avenida Defensores del Chaco que comprende desde la calle Enrique Pantoja hasta la calle Hugo Mealla, se tiene un valor medio de 4,627 % de vacíos, un valor mínimo de 4,527 % y un valor máximo de 4,711 %.

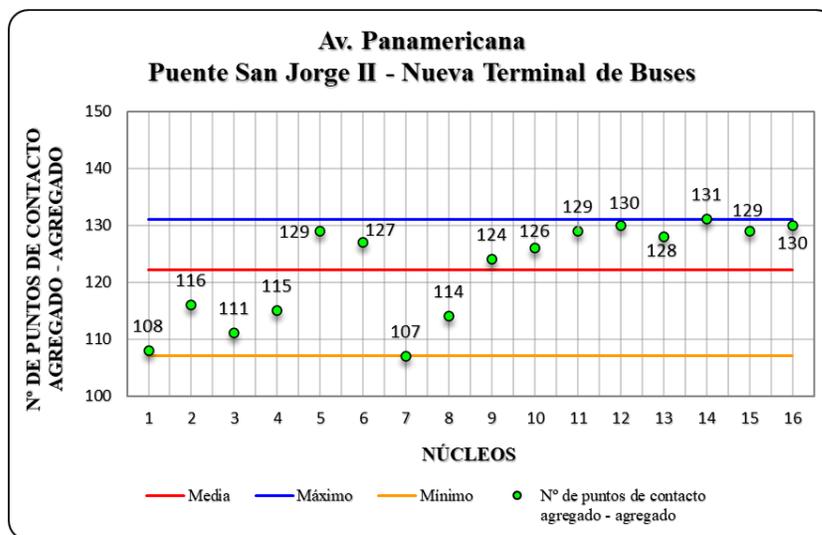
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,077 y un coeficiente de variación de 0,017.

Se encuentran entre el valor mínimo de 4,527 % y el valor medio de 4,627 % un total de 2 muestras, entre el valor máximo de 4,711 % y el valor medio de 4,627 % un total de 2 muestras.

### 3.9.1.3. Contacto agregado-agregado de núcleos con ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.16: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.16 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°1 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 16 núcleos.

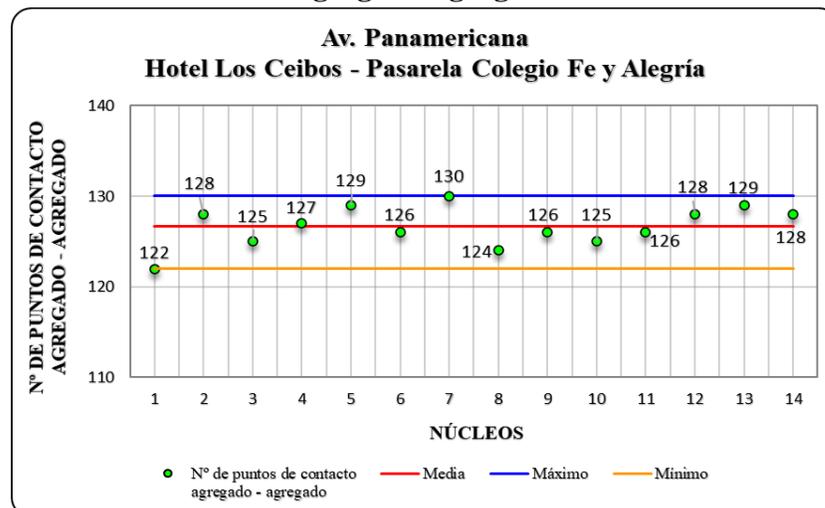
Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el puente de San Jorge II hasta el ingreso a la nueva terminal de buses, se tiene un valor medio de 122 puntos de contacto, un valor mínimo de 107 y un valor máximo de 131.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 8,671 y un coeficiente de variación de 0,071.

De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°1, se encuentran entre el valor mínimo de 107 y el valor medio de 122 un total de 6 muestras, entre el valor máximo de 131 y el valor medio de 122 un total de 10 muestras.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.17: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.17 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°2 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 14 núcleos.

Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el Hotel Los Ceibos hasta la pasarela del colegio Fe y Alegría, se tiene un valor medio de 127 puntos de contacto, un valor mínimo de 122 y un valor máximo de 130.

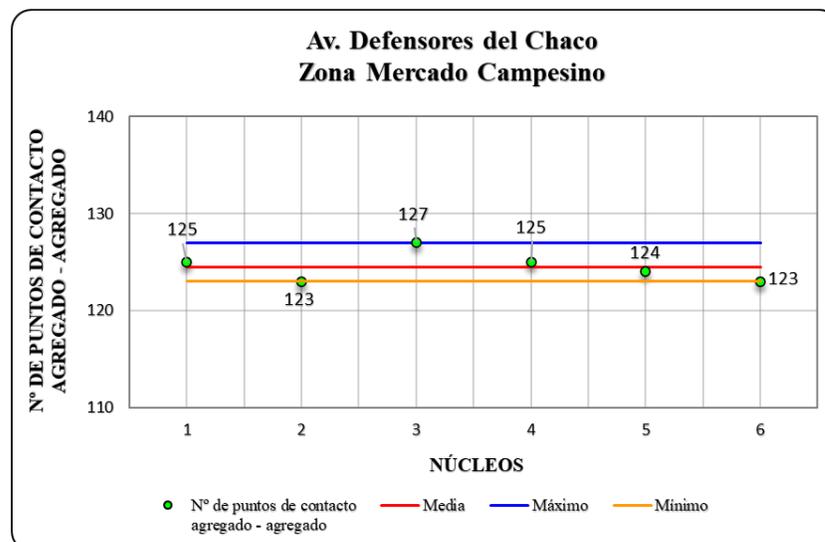
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 2,205 y un coeficiente de variación de 0,017.

De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°2, se encuentran entre el valor mínimo de 122 y el valor medio de 127 un total de 7 muestras, entre el valor máximo de 130 y el valor medio de 127 un total de 7 muestras.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.18: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - Ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.18 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°3 con ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Defensores del Chaco que comprende desde la calle Enrique Pantoja hasta la calle Hugo Mealla, se tiene un valor medio de 125 puntos de contacto, un valor mínimo de 123 y un valor máximo de 127.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 1,517 y un coeficiente de variación de 0,012.

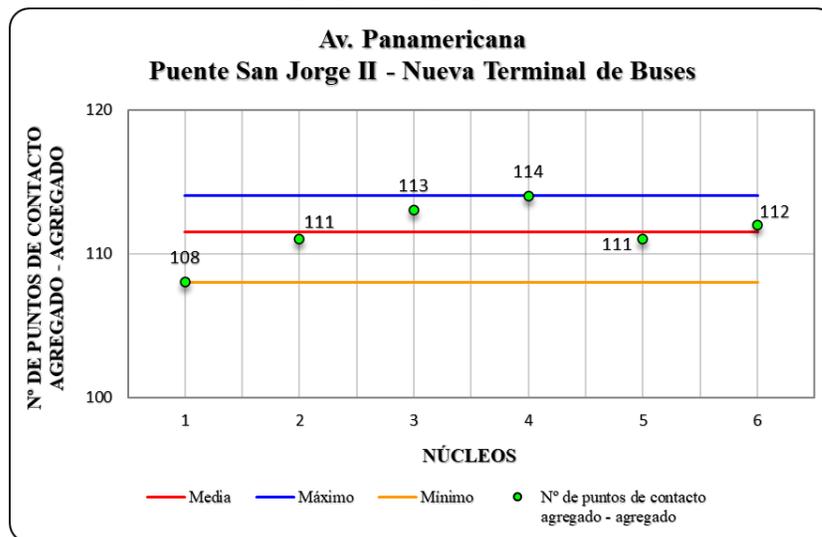
De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°3, se encuentran entre el valor mínimo de 123 y el valor medio de 125 un total de 3 muestras, entre el valor máximo de 127 y el valor medio de 125 un total de 3 muestras.

#### 3.9.1.4. Contacto agregado-agregado de núcleos sin ahuellamiento

- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.19: Contacto agregado-agregado tramo N°1 - No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.19 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°1 que no presentan ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

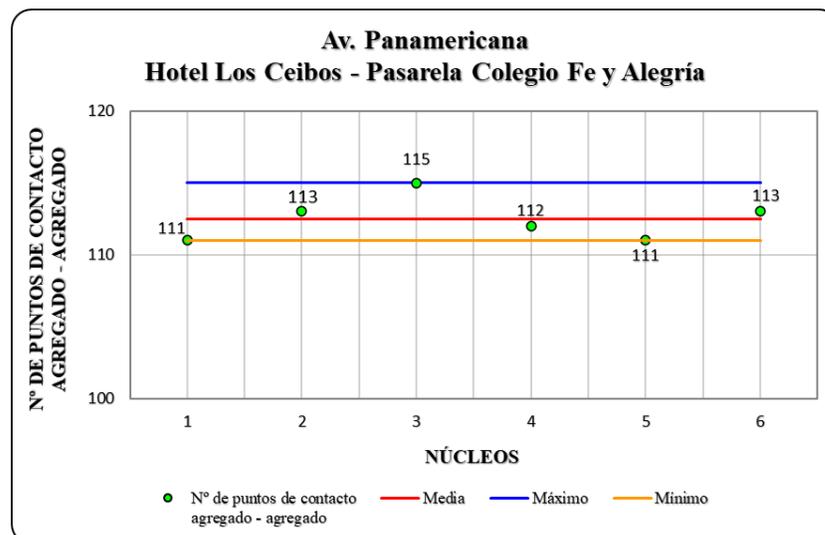
Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el puente de San Jorge II hasta el ingreso a la nueva terminal de buses, se tiene un valor medio de 112 puntos de contacto, un valor mínimo de 108 y un valor máximo de 114.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 2,074 y un coeficiente de variación de 0,019.

De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°1, se encuentran entre el valor mínimo de 108 y el valor medio de 112 un total de 3 muestras, entre el valor máximo de 114 y el valor medio de 112 un total de 3 muestras.

- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)  
**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.20: Contacto agregado-agregado tramo N°2 - No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.20 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°2 que no presentan ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 6 núcleos.

Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Panamericana que comprende desde el Hotel Los Ceibos hasta la pasarela del colegio Fe y Alegría, se tiene un valor medio de 113 puntos de contacto, un valor mínimo de 111 y un valor máximo de 115.

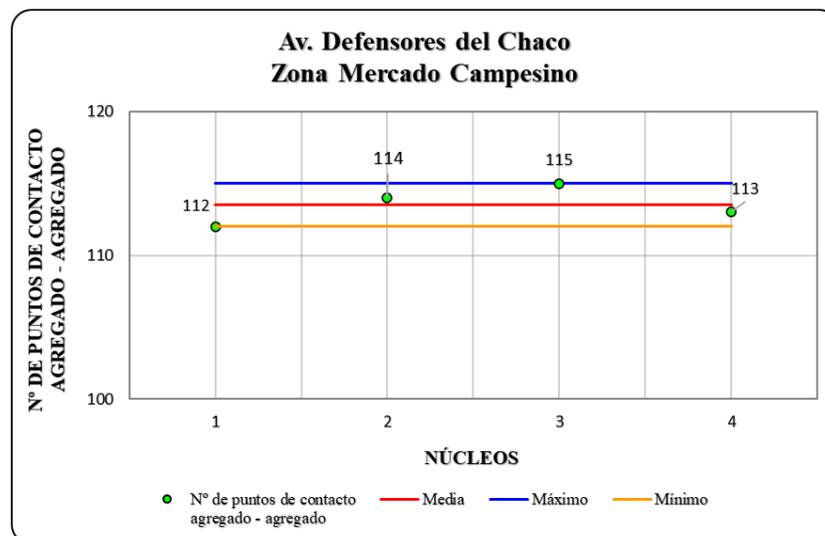
El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 1,517 y un coeficiente de variación de 0,013.

De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°2, se encuentran entre el valor mínimo de 111 y el valor medio de 113 un total de 3 muestras, entre el valor máximo de 115 y el valor medio de 113 un total de 3 muestras.

- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Área transversal de núcleo:** 7853,982 mm<sup>2</sup>

**Gráfica 3.21: Contacto agregado-agregado tramo N°3 - No ahuellado**



**Fuente:** Elaboración propia

En la gráfica 3.21 se observa la distribución de los valores de puntos de contacto de agregados pertenecientes a cada uno de los núcleos del tramo N°3 que no presentan ahuellamiento, también se presenta una línea roja que marca el valor medio, una línea naranja el valor mínimo y una línea azul el valor máximo de los puntos de contacto. Para este tramo son evaluados 4 núcleos.

Como resultado del análisis del número de puntos de contacto agregado-agregado de las muestras de núcleos asfálticos del tramo de la avenida Defensores del Chaco que comprende desde la calle Enrique Pantoja hasta la calle Hugo Mealla, se tiene un valor medio de 114 puntos de contacto, un valor mínimo de 112 y un valor máximo de 115.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 1,291 y un coeficiente de variación de 0,011.

De las muestras evaluadas para el número de puntos de contacto agregado-agregado en el tramo N°3, se encuentran entre el valor mínimo de 112 y el valor medio de 114 un total de 2 muestras, entre el valor máximo de 115 y el valor medio de 114 un total de 2 muestras.

### **3.9.2. Relación entre variables**

#### **3.9.2.1. Contacto agregado - Porcentaje de vacíos de núcleos con ahuellamiento**

En esta parte se realizará el análisis de las variables contacto agregado-agregado vs. porcentaje de vacíos a partir de los resultados encontrados con el análisis de las imágenes digitales obtenidas con TC-RX de núcleos de ahuellamiento, para determinar una posible relación existente entre ambas.

De esta forma conoceremos cual es el comportamiento de una variable respecto a la otra, para interpretar de mejor manera los resultados de la evaluación de ahuellamiento.

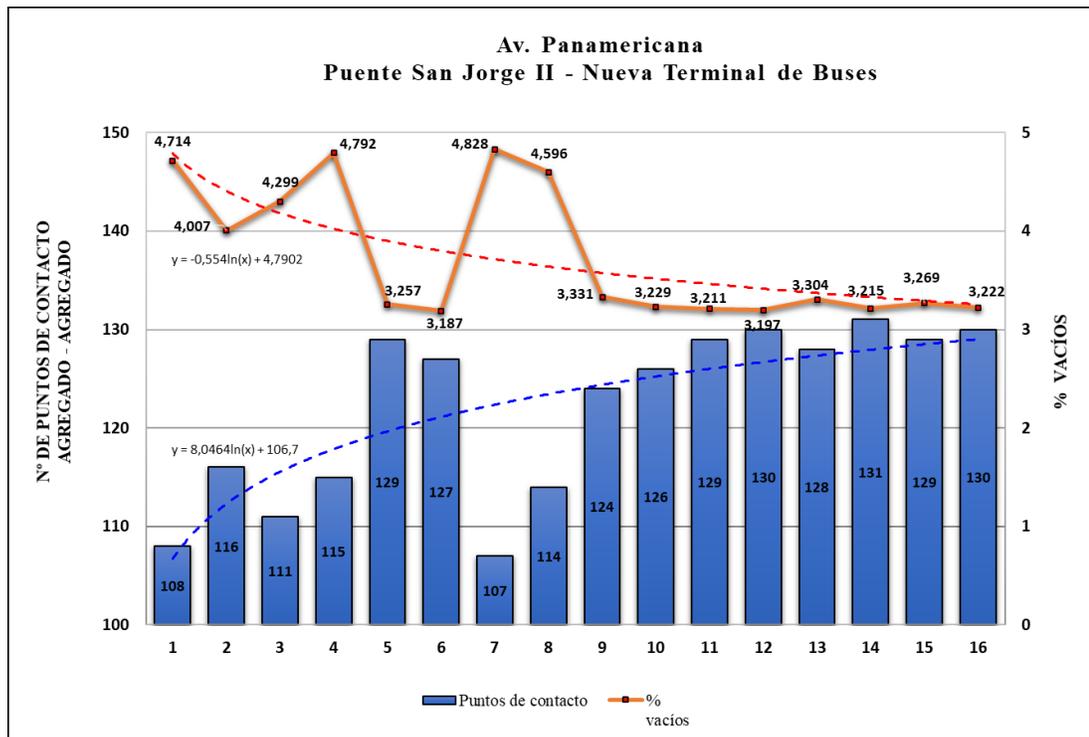
- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Tabla 3.41: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 - Ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	Ahuellamiento (mm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	6,990	12,000	5,575	108,000	4,714
2	6,520	15,000	5,325	116,000	4,007
3	6,690	13,000	5,421	111,000	4,299
4	7,140	11,000	5,466	115,000	4,792
5	7,210	31,000	5,573	129,000	3,257
6	6,410	34,000	5,699	127,000	3,187
7	7,030	10,000	5,396	107,000	4,828
8	6,540	13,000	5,315	114,000	4,596
9	7,520	30,000	5,682	124,000	3,331
10	6,220	32,000	5,510	126,000	3,229
11	7,650	33,000	5,652	129,000	3,211
12	6,420	34,000	5,432	130,000	3,197
13	6,270	31,000	5,445	128,000	3,304
14	6,200	34,000	5,552	131,000	3,215
15	6,930	30,000	5,623	129,000	3,269
16	6,840	35,000	5,645	130,000	3,222
<b>Media</b>	<b>6,786</b>	<b>24,875</b>	<b>5,519</b>	<b>122,125</b>	<b>3,729</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.22: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.41 presenta los resultados del pavimento del tramo N°1, donde los núcleos presentan un ahuellamiento promedio de 25 mm, que es considerado un daño de severidad media-alta, el espesor promedio del pavimento es de 6,8 cm, el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,52 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 122 y de vacíos de 3,729 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento del tramo N°1, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de ¾" (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.22 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°1, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos esa relación existente entre las dos variables, la cuales muestran que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

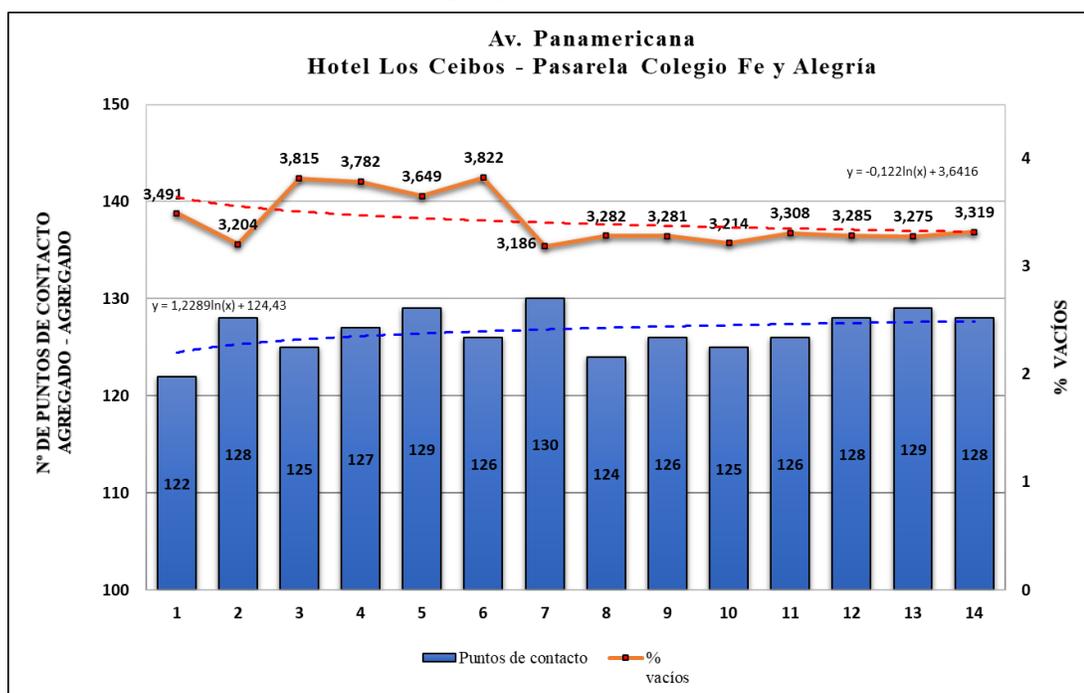
- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)

**Tabla 3.42: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 - Ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	Ahuellamiento (mm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	6,660	26,000	5,567	122,000	3,491
2	6,340	30,000	5,394	128,000	3,204
3	6,250	28,000	5,548	125,000	3,815
4	6,510	27,000	5,522	127,000	3,782
5	7,350	29,000	5,314	129,000	3,649
6	6,270	27,000	5,503	126,000	3,822
7	6,490	32,000	5,405	130,000	3,186
8	6,240	34,000	5,362	124,000	3,282
9	7,600	32,000	5,451	126,000	3,281
10	6,540	34,000	5,639	125,000	3,214
11	7,660	33,000	5,553	126,000	3,308
12	6,880	35,000	5,318	128,000	3,285
13	7,230	32,000	5,680	129,000	3,275
14	7,320	33,000	5,621	128,000	3,319
<b>Media</b>	<b>6,810</b>	<b>30,857</b>	<b>5,491</b>	<b>126,643</b>	<b>3,422</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.23: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.42 presenta los resultados del pavimento del tramo N°2, donde los núcleos presentan un ahuellamiento promedio de 31 mm, que es considerado un daño de severidad alta, el espesor promedio del pavimento es de 6,8 cm y el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,49 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 127 y de vacíos de 3,422 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento del tramo N°2, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.23 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°2, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos esa relación existente entre las dos variables, la cuales muestran que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

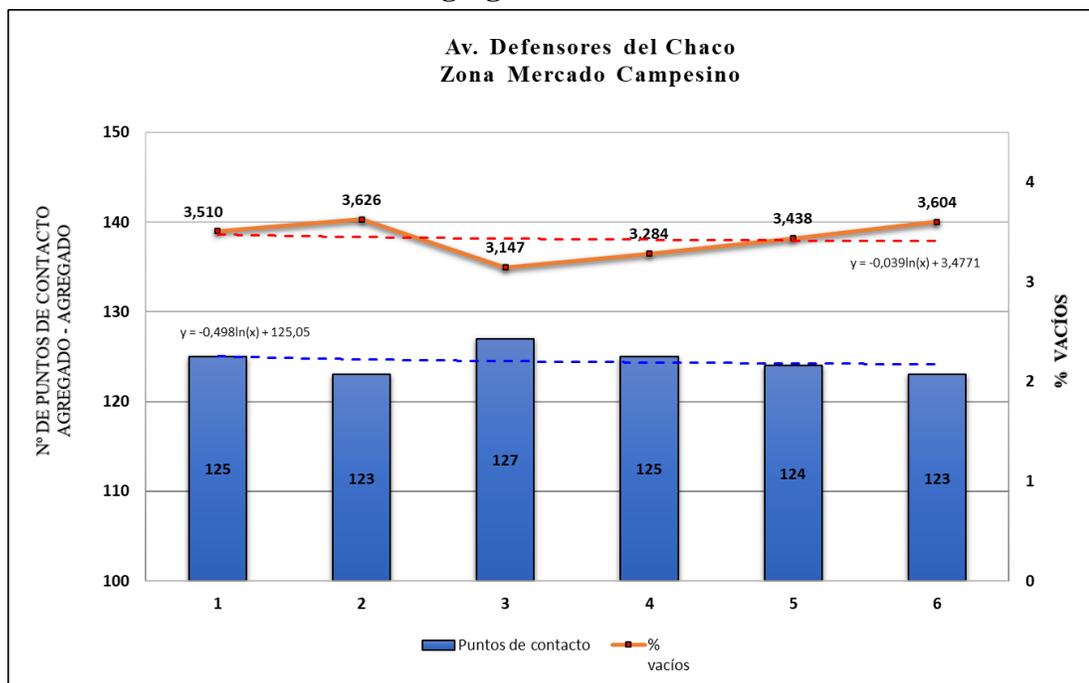
- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Tabla 3.43: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 - Ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	Ahuellamiento (mm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	5,110	30,000	5,643	125,000	3,510
2	5,280	26,000	5,580	123,000	3,626
3	5,550	33,000	5,540	127,000	3,147
4	5,380	31,000	5,480	125,000	3,284
5	5,940	27,000	5,695	124,000	3,438
6	5,860	29,000	5,488	123,000	3,604
<b>Media</b>	<b>5,520</b>	<b>29,333</b>	<b>5,571</b>	<b>124,500</b>	<b>3,435</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.24: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 - Ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.43 presenta los resultados del pavimento del tramo N°3, donde los núcleos presentan un ahuellamiento promedio de 29 mm, que es considerado un daño de severidad alta, el espesor promedio del pavimento es de 5,5 cm y el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,57 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 125 y de vacíos de 3,435 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento del tramo N°3, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de ¾" (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.24 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°3, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos esa relación existente entre las dos variables, la cuales muestran que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

### 3.9.2.2. Contacto agregado - Porcentaje de vacíos de núcleos sin ahuellamiento

En esta parte se realizará el análisis de las variables contacto agregado-agregado vs. porcentaje de vacíos a partir de los resultados encontrados con el análisis de las imágenes digitales obtenidas con TC-RX de núcleos sin ahuellamiento que fueron extraídos de las partes que están en buenas condiciones de los tramos evaluados, para determinar una posible relación existente entre ambas.

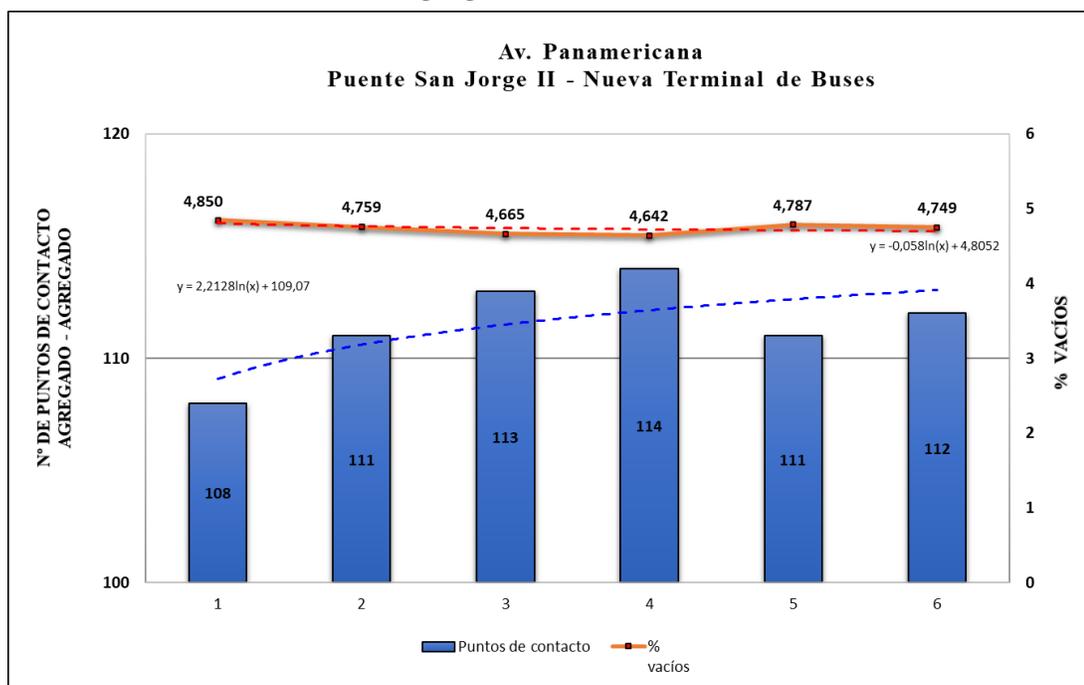
- **Tramo N°1:** Av. Panamericana (Puente San Jorge II – Nueva terminal de buses)

**Tabla 3.44: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 – No ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	7,130	5,638	108,000	4,850
2	6,550	5,607	111,000	4,759
3	6,700	5,475	113,000	4,665
4	6,870	5,522	114,000	4,642
5	7,220	5,715	111,000	4,787
6	6,790	5,653	112,000	4,749
<b>Media</b>	<b>6,877</b>	<b>5,602</b>	<b>111,500</b>	<b>4,742</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.25: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°1 – No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.44 presenta los resultados de los núcleos de pavimento flexible sin ahuellamiento del tramo N°1, el espesor promedio del pavimento es de 6,9 cm y el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,60 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 112 y de vacíos de 4,742 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento sin ahuellamiento del tramo N°1, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de ¾" (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.25 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°1, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

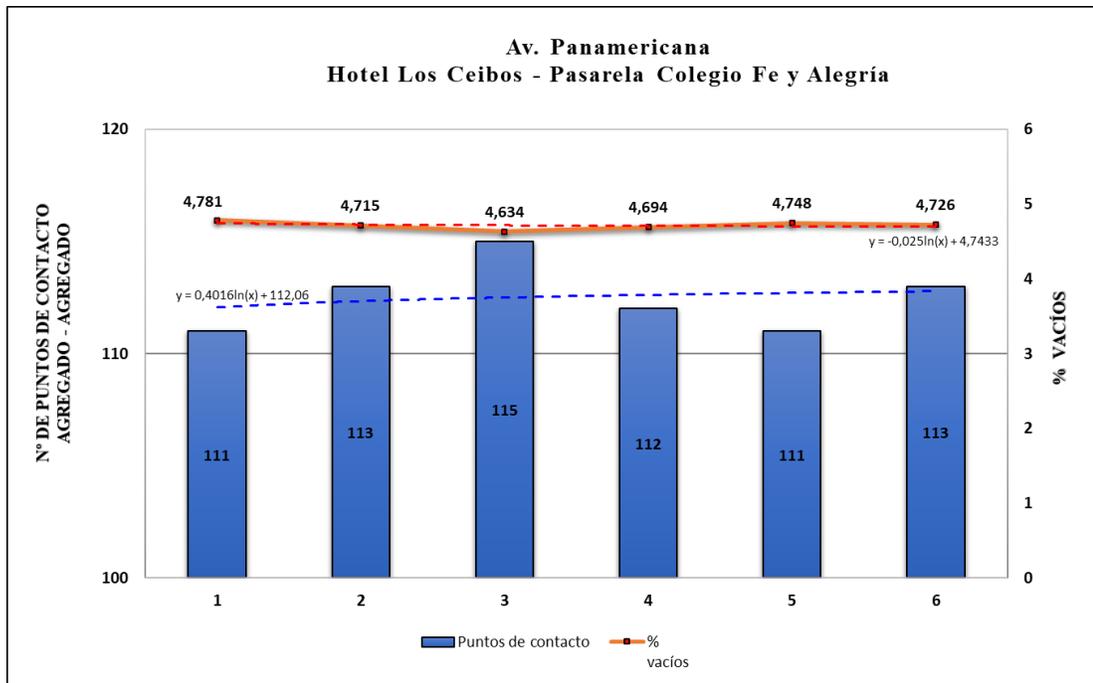
- **Tramo N°2:** Av. Panamericana (Hotel Los Ceibos – Pasarela colegio Fe y Alegría)

**Tabla 3.45: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 – No ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	6,850	5,323	111,000	4,781
2	6,630	5,555	113,000	4,715
3	6,720	5,575	115,000	4,634
4	6,560	5,595	112,000	4,694
5	7,120	5,643	111,000	4,748
6	6,910	5,678	113,000	4,726
<b>Media</b>	<b>6,798</b>	<b>5,562</b>	<b>112,500</b>	<b>4,716</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.26: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°2 – No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.45 presenta los resultados de los núcleos de pavimento flexible sin ahuellamiento del tramo N°2, el espesor promedio del pavimento es de 6,8 cm y el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,56 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 113 y de vacíos de 4,716 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento sin ahuellamiento del tramo N°2, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de ¾" (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.26 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°2, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

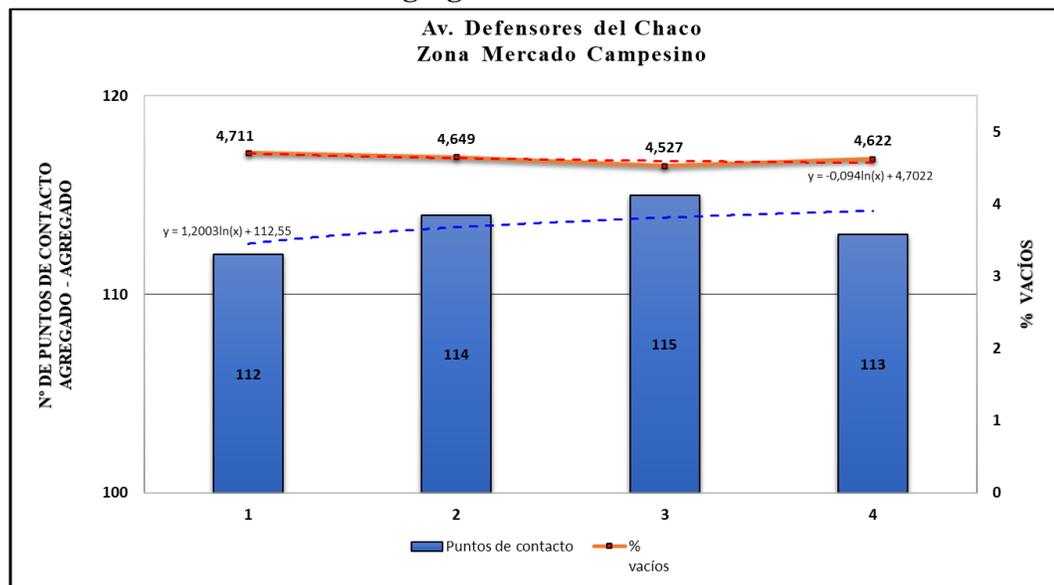
- **Tramo N°3:** Av. Defensores del Chaco (Mercado Campesino)

**Tabla 3.46: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 – No ahuellado**

N° de núcleo	Altura (cm)	% asfalto	Puntos de contacto	% vacíos
1	5,820	5,521	112,000	4,711
2	5,910	5,687	114,000	4,649
3	5,760	5,754	115,000	4,527
4	5,730	5,634	113,000	4,622
<b>Media</b>	<b>5,805</b>	<b>5,649</b>	<b>113,500</b>	<b>4,627</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.27: Contacto agregado vs. vacíos tramo N°3 – No ahuellado**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.46 presenta los resultados de los núcleos de pavimento flexible sin ahuellamiento del tramo N°3, el espesor promedio del pavimento es de 5,8 cm y el contenido óptimo de cemento asfáltico promedio presente en las muestras de núcleos extraídos es de 5,65 %. El promedio de puntos de contacto agregado-agregado es de 114 puntos y de vacíos de 4,627 %.

De los resultados del análisis granulométrico realizado a los núcleos de pavimento del tramo N°3, se tiene que el tamaño máximo nominal del agregado es de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm), la distribución granulométrica se ajusta a un diseño bajo la faja de trabajo C, según especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

En la gráfica 3.27 relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos para los núcleos extraídos del tramo N°3, se determina una relación existente entre ambas, a través de la adición al gráfico de líneas de tendencia observamos que a mayor porcentaje de vacíos se presenta un menor número de puntos de contacto entre agregados en la estructura interna de los núcleos evaluados y viceversa.

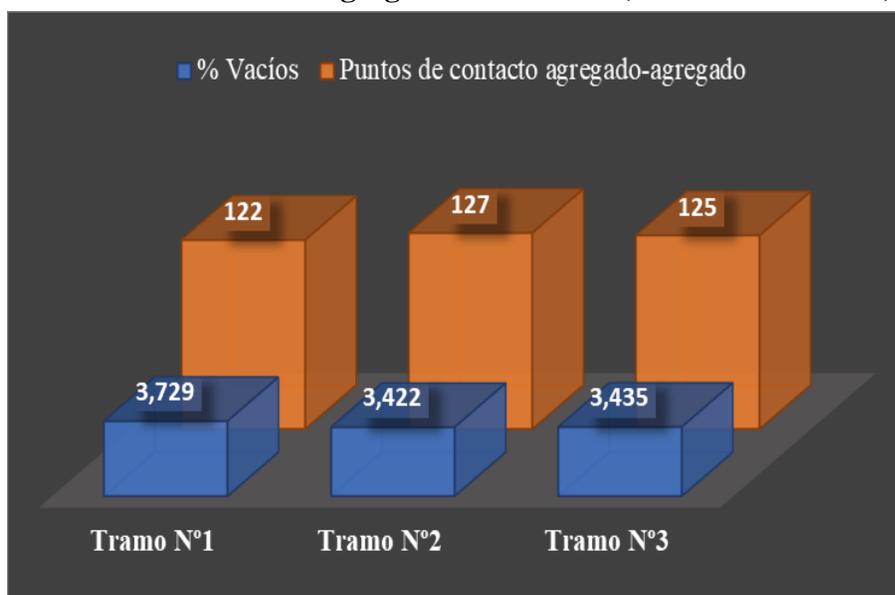
## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- Con los resultados obtenidos del análisis a los núcleos extraídos de los diferentes tramos de pavimento flexible con ahuellamiento en su capa asfáltica, por medio de la tomografía computarizada de rayos-x, se realizó la comparación de variables entre el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos para encontrar una posible relación entre ellas. Se determinó que a mayor número de puntos de contacto entre agregados se presenta un menor porcentaje de vacíos en la estructura interna de la capa asfáltica.

**Gráfica 4.1: Contacto agregado – % Vacíos (núcleos ahuellados)**



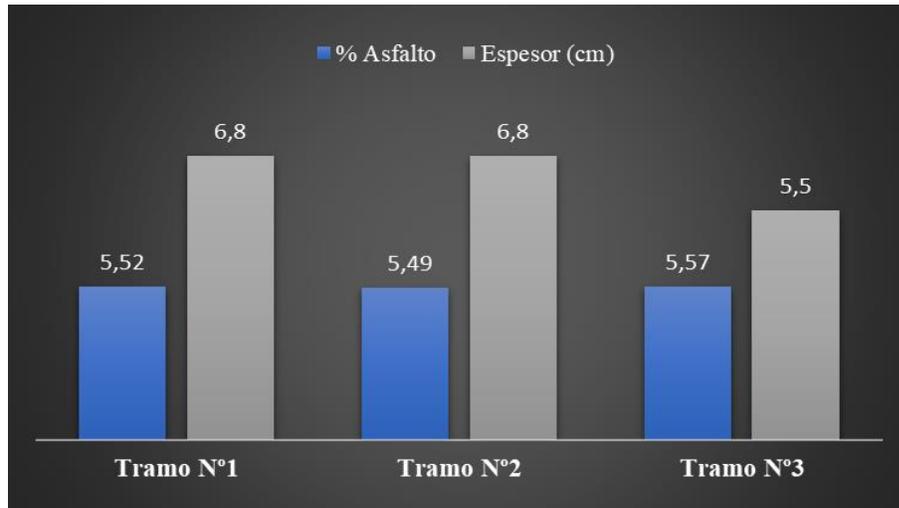
**Fuente:** Elaboración propia

- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos con ahuellamiento en el tramo N°1 con un valor de 3,729 % y 122 puntos de contacto entre agregados. El espesor promedio del pavimento es de 6,8 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,52 %.
- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos con ahuellamiento en el tramo N°2 con un valor de 3,422 % y 127 puntos de contacto entre agregados. El espesor

promedio del pavimento es de 6,8 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,49 %.

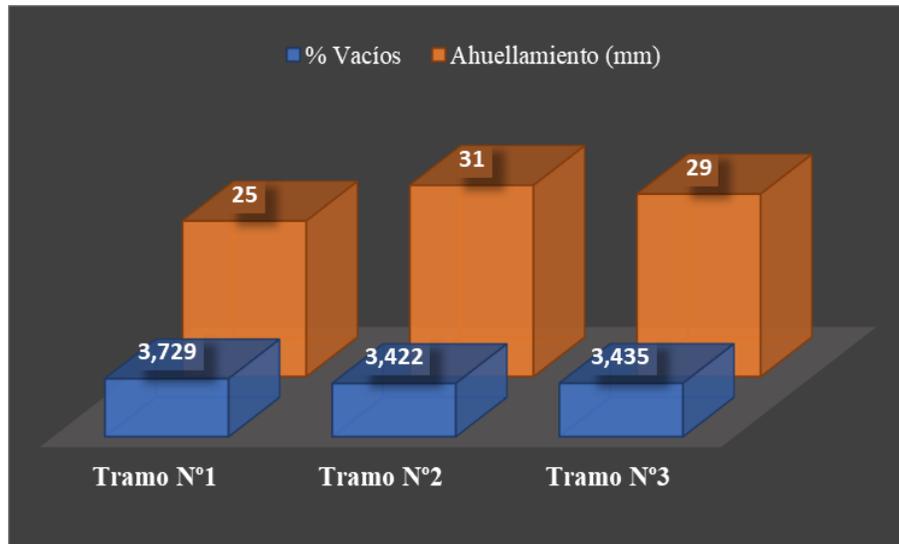
- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos con ahuellamiento en el tramo N°3 con un valor de 3,435 % y 125 puntos de contacto entre agregados. El espesor promedio del pavimento es de 5,5 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,57 %.

**Gráfica 4.2: % Asfalto y espesor de pavimento (núcleos ahuellados)**



Fuente: Elaboración propia

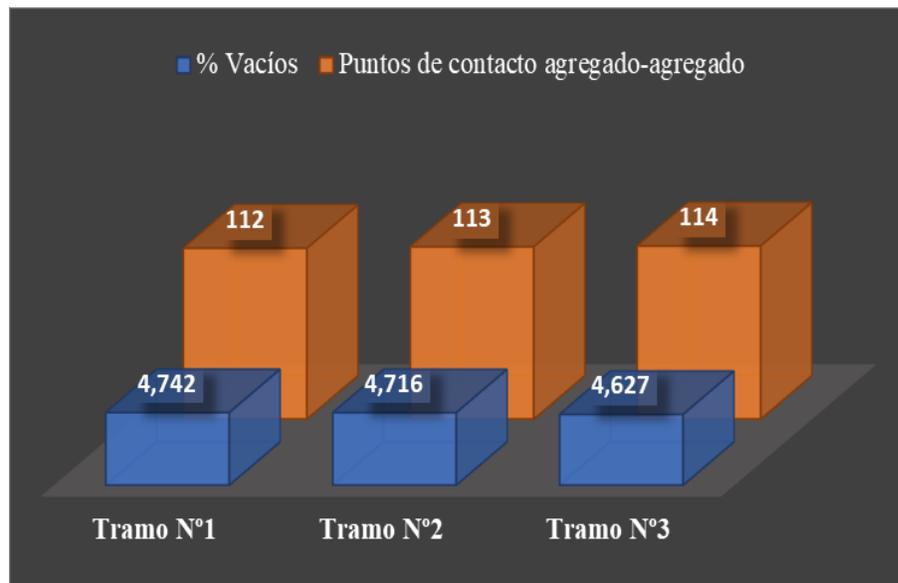
**Gráfica 4.3: % Vacíos – Ahuellamientos (núcleos ahuellados)**



Fuente: Elaboración propia

- Se tiene un promedio de ahuellamiento en el Tramo N°1 de 25 mm, el cual es considerado un daño de severidad media-alta.
- Se tiene un promedio de ahuellamiento en el Tramo N°2 de 31 mm, el cual es considerado un daño de severidad alta.
- Se tiene un promedio de ahuellamiento en el Tramo N°3 de 29 mm, el cual es considerado un daño de severidad alta.
- Analizando los resultados de las depresiones (ahuellamientos) de la capa asfáltica y vacíos de los núcleos de tramos ahuellados, se observa que se establece una relación entre el porcentaje de vacíos y los ahuellamientos, llegando a la conclusión de que a mayor ahuellamiento existe una menor presencia de vacíos.

**Gráfica 4.4: Contacto agregado – % Vacíos (núcleos no ahuellados)**

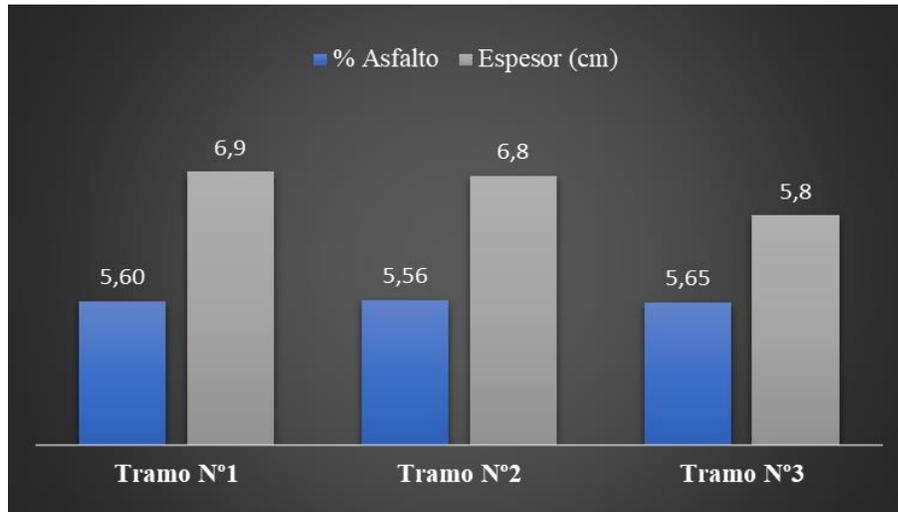


**Fuente:** Elaboración propia

- Obtenidos los resultados de la cantidad de puntos de contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos de los núcleos sin ahuellamiento extraídos de partes que están en buenas condiciones de los tramos evaluados y que presentan regularidad superficial, y comparándolos con los resultados de los núcleos con ahuellamiento; observamos que los núcleos que no presentan ahuellamiento tienen un promedio de puntos de contacto mayores a 110 puntos y contenidos de vacíos cercanos a 5 %, mientras los núcleos con ahuellamiento presentan un promedio de puntos de

contacto mayores a 120 puntos y contenido de vacíos menores a 4 %. Lo que demuestra que la presencia de ahuellamiento en el pavimento flexible provoca que al reducir el porcentaje de vacíos aumenta los puntos de contacto entre agregados.

**Gráfica 4.5: % Asfalto y espesor de pavimento (núcleos no ahuellados)**



**Fuente:** Elaboración propia

- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos sin ahuellamiento en el tramo N°1 con un valor de 4,742 % y 112 puntos de contacto entre agregados. El espesor promedio del pavimento es de 6,9 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,60 %.
- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos sin ahuellamiento en el tramo N°2 con un valor de 4,716 % y 113 puntos de contacto entre agregados. El espesor promedio del pavimento es de 6,8 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,56 %.
- Se tiene el promedio de vacíos de los núcleos sin ahuellamiento en el tramo N°3 con un valor de 4,627 % y 114 puntos de contacto entre agregados. El espesor promedio del pavimento es de 5,8 cm, el contenido de cemento asfáltico promedio es de 5,65 %.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda considerar como método de control desde el inicio y durante la vida útil de proyectos de pavimentos, a la aplicación de TC-RX, para analizar la variación del estado de la estructura interna de la capa asfáltica a causa del ahuellamiento.
- La muestra extraída de núcleo asfáltico no debe sufrir ningún daño durante la operación de corte y posterior traslado para la aplicación del proceso tomográfico.
- Se recomienda prestar mucha atención al momento de utilizar el programa de procesamiento de imágenes digitales para realizar un correcto análisis.
- Se recomienda aplicar esta técnica de imágenes digitales a través de rayos-x de tomografía computarizada para evaluar los pavimentos flexibles afectados por ahuellamiento, para conocer las características de la estructura interna que presentan; tales como el porcentaje de vacíos y el contacto de agregados.
- Se recomienda la aplicación de esta metodología por el grado de confiabilidad de los datos obtenidos, haciendo uso del avance tecnológico y siendo un método disponible de aplicar en nuestro medio.