

# CUENCOS DE DEFLEXIÓN 3D EN PAVIMENTO FLEXIBLE

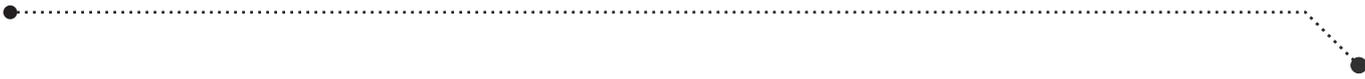
DEFLECTION BOWLS 3D IN FLEXIBLE PAVING

TIGELAS DE DEFLEXÃO 3D EM PAVIMENTAÇÃO FLEXÍVEL

**Daniela Andrea Hernández-Rojas**  
**\*Carlos Hernando Higuera-Sandoval**

ª Ingeniería, Ingeniería de Transporte y Vías,  
Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia,  
daniela.hernandez01@uptc.edu.co.

º Ingeniería, Ingeniería de Transporte y Vías,  
Universidad Pedagógica y Tecnología de  
Colombia, carlos.higuera@uptc.edu.co.



**Resumen**— Cuando se diseña un modelo de construcción de pavimento flexible, debe cumplir con los estándares de valores admisibles y porcentajes de reserva de esfuerzos, deformaciones y deflexiones para que puedan otorgar servicio durante el periodo de diseño. La deflexión por estar dentro de los criterios admisibles esenciales; se vuelve un factor importante de estudio por lo que el objetivo de este artículo es el análisis del efecto y daño que provoca las cargas de tránsito mediante espectros de carga aplicando la teoría elástica determinando y graficando los cuencos de deflexión transversales y longitudinales en 2D y 3D; para un vehículo de configuración 3S1 con pesos por eje máximos permitidos por la normatividad Colombiana y modelado en WinJULEA con una estructura de pavimento típica para la determinación de deflexiones en más de 600 puntos; analizando el daño provocado en el pavimento donde se encontraron deflexiones mayores a 1 mm producto de la carga monotónica de cada eje y de interposición de bulbos de deflexión que crean puntos críticos donde el pavimento sufre un daño similar al encontrado debajo de los platos de carga.

**Palabras clave**— Cuenco de deflexión, modelación 3D, pavimento flexible, teoría elástica.

**Abstract**— When designing a flexible pavement construction model, it must meet the standards for allowable values and reserve percentages for stresses, strains, and deflections so that they can provide service during the design period. Deflection for being within the essential admissible criteria; It becomes an important study factor, so the objective of this article is the analysis of the effect and damage caused by traffic loads through load spectra, applying the elastic theory, determining and graphing the transversal and longitudinal deflection bowls in 2D and 3D. ; for a 3S1 configuration vehicle with maximum axle weights allowed by Colombian regulations and modeled in WinJULEA with a typical pavement structure to determine deflections in more than 600 points; analyzing the damage caused to the pavement where deflections greater than 1 mm were found as a result of the monotonic load of each axis and the interposition of deflection bulbs that create critical points where the pavement suffers damage similar to that found under the load plates.

**Keywords**— Deflection bowl, 3D modeling, flexible pavement, elastic theory.



**Resumo**— Ao projetar um modelo de construção de pavimento flexível, ele deve atender aos padrões de valores permitidos e porcentagens de reserva para tensões, deformações e deflexões para que possam fornecer serviço durante o período de projeto. Desvio por estar dentro dos critérios essenciais de admissibilidade; Torna-se um importante fator de estudo, portanto o objetivo deste artigo é a análise do efeito e dano causado pelas cargas de tráfego através de espectros de carga, aplicando a teoria elástica, determinando e graficando as tigelas de deflexão transversal e longitudinal em 2D e 3D. ; para um veículo de configuração 3S1 com pesos máximos por eixo permitidos pela regulamentação colombiana e modelado em WinJULEA com uma estrutura de pavimento típica para determinar deflexões em mais de 600 pontos; analisar os danos causados ao pavimento onde foram encontradas flechas superiores a 1 mm em função da carga monotônica de cada eixo e da interposição de bulbos de deflexão que criam pontos críticos onde o pavimento sofre danos semelhantes aos encontrados sob as placas de carga.

**Palavras chave**— Tigela de deflexão, modelagem 3D, pavimento flexível, teoria elástica.

## I. INTRODUCCION

Las estructuras de pavimento flexible experimentan a lo largo de su vida útil diversas magnitudes de deflexiones ocasionadas principalmente por el espectro de las cargas del tránsito. Las deflexiones se han convertido en un importante y fundamental parámetro de entrada para determinar la capacidad de respuesta estructural de un pavimento flexible en servicio (Higuera, 2006) por lo que es de suma importancia calcularla con precisión. Para esto, en los últimos años se han desarrollado varias metodologías (estáticas, pseudoestáticas y dinámicas) y equipos que permiten hallar un valor de deflexión que se aproxime a las condiciones reales de campo. Los equipos más utilizados son: la viga benkelman, el deflectómetro de impacto (FWD) y el traffic speed deflectometer (TSD) (Chai, Golding, Kelly & Chowdhry, 2016). La magnitud de la deflexión también se puede controlar como un parámetro de diseño siguiendo el criterio de Huang (Huang, 2003), el cual sigue la teoría de Burmister (1943), de un sistema multicapa – elástico, isotrópico y homogéneo.

El presente artículo se enfoca en determinar el cuenco de deflexión ocasionado por un vehículo comercial típico que circula por las carreteras de Colombia, a través del Software WinJULEA desarrollado por (MEPDEG) el cual, se basa en la teoría elástica de un sistema multicapa. De esta manera, se busca obtener el cuenco de deflexión en 2D y 3D para observar la respuesta

y el comportamiento de la estructura de pavimento frente a las cargas de un vehículo pesado completo considerando las cargas máximas legales estipuladas por la resolución 4100 de 2004; analizando a fondo el patrón de las deflexiones y sus magnitudes tanto longitudinal como transversalmente.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A) Antecedentes.

En la práctica, el cálculo de deflexiones se utiliza principalmente para determinar la capacidad estructural que tiene una estructura de pavimento flexible en servicio; lo cual se utiliza para plantear y aplicar alternativas de mantenimiento acorde al estado de la estructura.

De acuerdo a lo anterior, en los últimos años se han creado varias metodologías y equipos que permiten calcular cuencos de deflexión aproximándose a las condiciones en campo producido por las cargas del tránsito; cabe destacar el deflectómetro de impacto (FWD) el cual aplica la carga de un semieje estándar (40KN) y a través de un proceso de retro cálculo; determina los módulos de las capas, así como sus propiedades de rigidez; siendo este uno de los instrumentos más utilizados a nivel mundial (Nega, Nikraz, & Al-Qadi, 2016) (Rashid & Ahmed, 2019) (Rashid & Ahmed, 2019).

Por otro lado, también se puede para evaluar el pavimento frente a sobrecargas del tránsito ya que algunas superan los 40 KN del semi eje estándar. Esto se

realiza modificando la altura de caída a tal punto de producir una carga desde 40 KN hasta 120 KN que son las cargas que mayor deterioran al pavimento; logrando determinar, una función a partir de los valores de los cuencos de deflexión que producen (Prastyanto & Mochtar, 2017) (Elbagalati, Elseifi, Gaspard & Zhang, 2017). De igual manera, este equipo también es utilizado para evaluar pavimentos para aeropuertos en cuanto a su desempeño, además de validarlo con el método del elemento finito (Tarefder & Ahmed, 2014). Este método es muy confiable y arroja resultados con una precisión muy alta, sin embargo; se están implementando métodos más sofisticados como la instrumentalización vial para medir deflexiones a través de geófonos y acelerómetros, representando una ventaja ya que permite medir continuamente valores de deflexiones de los diferentes vehículos sin tener que parar el tránsito; lo complejo es el tratamiento de datos y la interpretación de los mismos (Baharni, Blanc, Hornych & Menant, 2020) (Bahrani, Hornych & Menant, 2019).

Otro equipo como el traffic speed deflectometer (TSD), permite medir deflexiones en un carro en movimiento a una velocidad de 80 km/h, en el estudio de (Chai, Golding, Kelly & Chowdhry, 2016), determinaron una correlación entre el TSD y el FWD; en el estudio de (Mshali & Steyn, 2019) introdujeron la velocidad de los camiones y observaron cómo cambiaban los cuencos al aumentar la velocidad del vehículo comercial.

Si se desea rapidez en la toma y procesamiento de información en deflexiones, se pueden determinar de manera teórica como se pretende realizar en este artículo a través de un software que permitan realizar este tipo de análisis ya sea considerando las características elásticas lineales o el comportamiento elastoplástico y viscoelástico de los materiales, dependiendo del alcance del programa. (Chabot, Chupin, Deloffre & Duhamel, 2010).

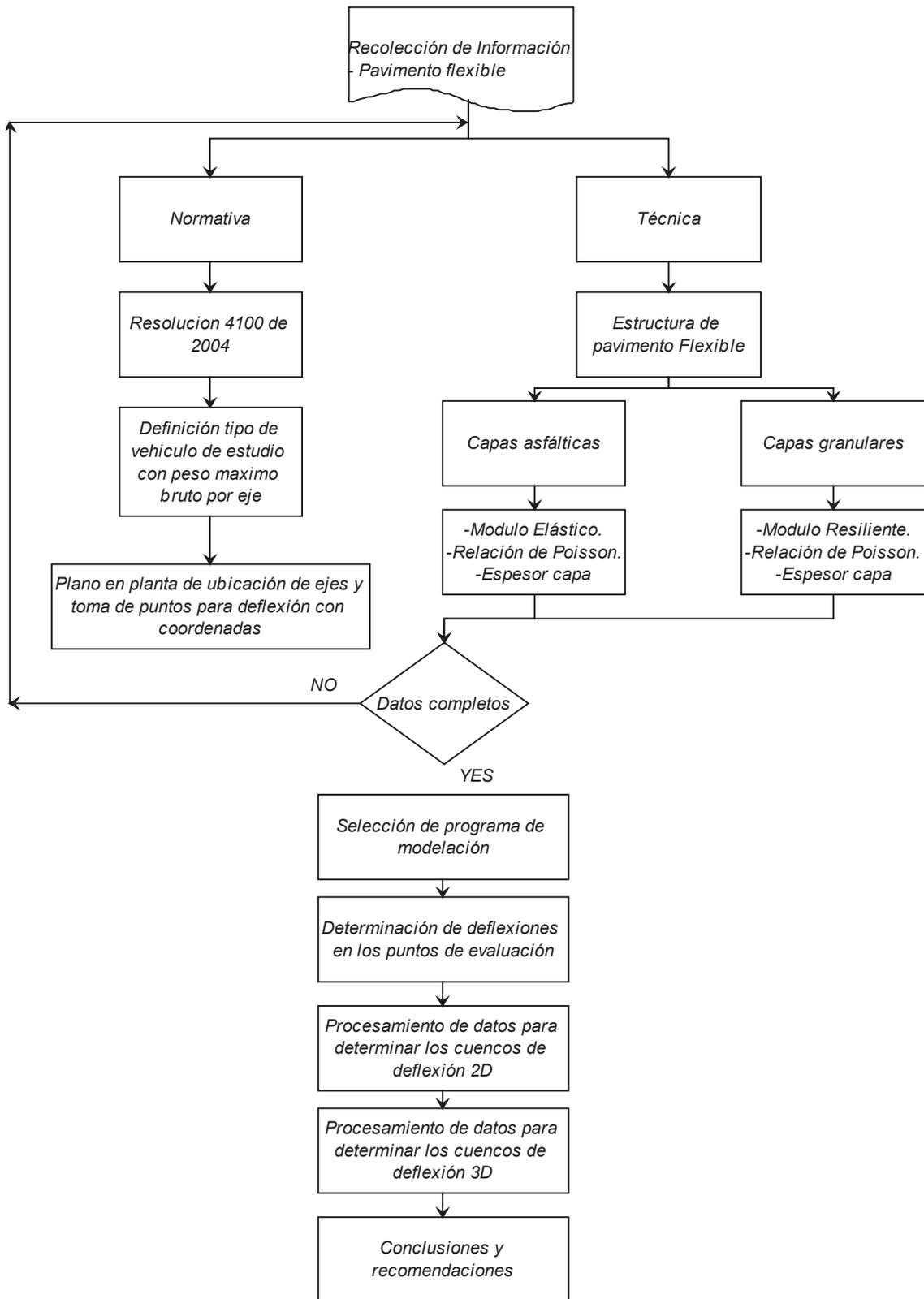
## **B) Metodología general.**

Como metodología se define el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 1 que resume de manera muy simplificada el procedimiento seguido en la obtención de deflexiones en un pavimento flexible para la determinación de los cuencos de deflexión.

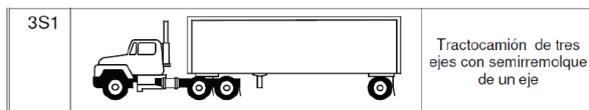
### **1) Normatividad y vehículo de estudio**

Para realizar la modelación y el análisis de los cuencos de deflexión se seleccionó el vehículo 3S1 según la nomenclatura dada en la Resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte y en ella se presenta la configuración del vehículo 3S1, el número y tipo de ejes y el peso de los ejes.

El vehículo de estudio, como se puede ver en la Figura 2, corresponde a un 3S1 – Tracto camión de tres ejes con semirremolque de un eje. A cada uno de estos ejes se le asigna peso máximo comercial de acuerdo con la Resolución 4100 de 2004.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de metodología.  
Fuente: Autores del proyecto.



Tipo de eje	Peso máximo por eje, kg
<i>Eje sencillo</i>	
Dos llantas	6.000
Cuatro llantas	11.000
<i>Eje tandem</i>	
Cuatro llantas	11.000
Seis llantas	17.000
Ocho llantas	22.000
<i>Eje trídem</i>	
6 llantas	16.500
8 llantas	19.000
10 llantas	21.500
12 llantas	24.000

**Figura 2.** Vehículo de estudio.  
Fuente: Resolución 4100 de 2004. Ministerio de Transporte.

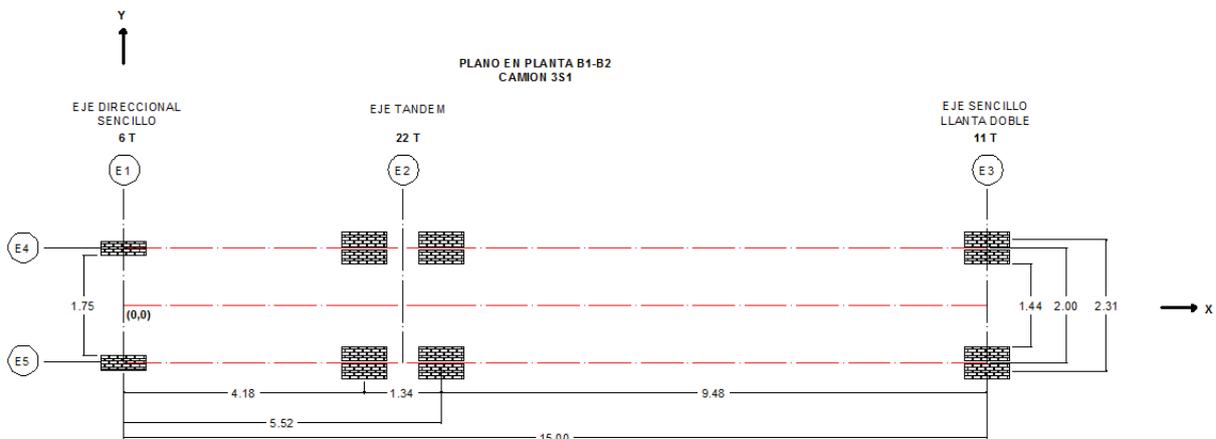
Como se puede observar en la Tabla 1, la configuración de ejes del camión 3S1, se

compone de un eje sencillo direccional, un tándem de 8 llantas y un eje sencillo de 4 llantas con pesos máximos de 6, 22, y 11 toneladas respectivamente. Estos datos se conjugan con toma real de mediciones de separación de ejes tanto longitudinalmente como transversal y ancho de llanta obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Figura 3.

**Tabla 1.** Configuración camión 3S1, peso máximo.

Vehículo	Tipo de ej	No. Llantas	Peso por Ej [Ton]
<b>Cabezot</b>	Direccional Sencillo	2	6
	Tándem	8	22
<b>Semiremolqu</b>	Sencillo	4	11

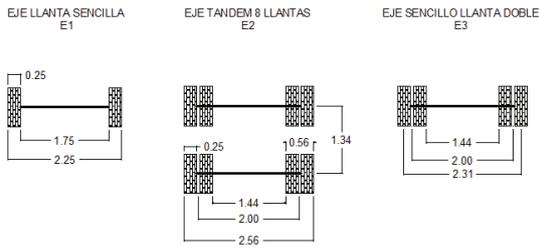
Fuente: Resolución 4100 de 2004. Ministerio de Transporte.



**Figura 3.** Planta del camión 3S1.  
Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Figura 3, las distancias entre ejes permiten tener el plano donde se determinan las coordenadas de los puntos de evaluación por lo que esta toma de información es esencial para la modelación y obtención de resultados. Adicional a ello, se debe

tener en cuenta la distancia que hay entre llantas y ancho de llanta por tipo de eje que configura el camión 3S1; los cuales, permitirán calcular el área de contacto para cada eje como se puede observar en la Figura 4.



**Figura 4.** Configuración de ejes del camión 3S1.  
Fuente: Autores.

Con la información completa del vehículo, se procede a determinar la carga por llanta por tipo de eje, ya que cada eje tiene su propia carga máxima y número de llantas, lo que cambia la magnitud de la carga que el vehículo está transmitiendo al pavimento. A manera de ejemplo, se muestra el procedimiento nombrado por (Higuera, 2010) para la obtención de carga por llanta, presión de contacto, radio de plato de carga, separación y área de contacto para el eje tándem de 8 llantas.

**a. Carga por llanta o rueda para el eje Tándem.**

Para la carga por llanta, es necesario tener la carga máxima por eje determinada en la Resolución 4100 de 2004 y el número de llantas que componen el eje. Para el caso de un tándem, el número de llantas son 8 que corresponden a un peso máximo por eje de 22 toneladas; el cual se divide por 8 para determinar la carga por llanta mediante la ecuación 1.

$$P = \frac{\text{Carga por eje}}{\text{No. de llantas}} = \frac{22000}{8} = 2750 \text{ Kg} \quad (1)$$

**b. Presión de contacto.**

La presión de contacto es uno de los valores principales en el cálculo del radio de plato de carga. Definido como la presión dada por el neumático inflado a través del área de contacto; por lo que entre más inflado este el neumático, menor es el radio de plato de carga y el área de contacto y la cual se aplica de manera uniforme (Huang et al., 2003) (Yoder & Witczak, 1975). Sin embargo, hay estudios que señalan que la presión de contacto no es completamente uniforme ya que presenta un comportamiento parabólico (Beer, Fisher & Kannemeyer, 2004). Para el caso de estudio, se toma un valor estándar haciendo la respectiva conversión mediante la ecuación (2).

$$q = 0.70 \text{ MPa} * 10.2 = 7.14 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \quad (2)$$

**c. Radio de plato de carga.**

El radio del plato de carga se determina asumiendo que el área de contacto del neumático es circular. Esta depende de la carga aplicada por llanta - P y la presión de contacto - q como se muestra en la ecuación (3).

$$a = \left( \frac{P}{\pi * q} \right)^{0.5} = \left( \frac{2750 \text{ kg}}{\pi * 7.14 \text{ Kg/cm}^2} \right)^{0.5} = 11.07 \text{ cm} \quad (3)$$

**d. Separación.**

La separación – s es la distancia existente entre platos de carga calculada medida en campo o teóricamente como se muestra a continuación usando la ecuación (4).

$$s = 3 * a$$

$$s = 3 * 11.07 \text{ cm} = \mathbf{33.21 \text{ cm}} \rightarrow \mathbf{s/2 = 16.61 \text{ cm}} \quad (4)$$

#### e. Área de Contacto

El área de contacto - Ac es la parte del neumático que tiene interacción directa con el pavimento haciendo posible la transferencia de carga (Daniel, Kortiš, Decký, Pisca & Fabo, 2018). Esta depende del radio de plato de carga como se indica en la ecuación (5).

$$Ac = \pi * a^2 = \mathbf{384.99 \text{ cm}^2} \quad (5)$$

**Tabla 2.** Datos de modelación por tipo de eje.

PARAMETRO	Direccional	Tándem	Sencillo Trasero	Unida
Carga por ej	6000	22000	11000	Kg
# de ruedas	2	8	4	-
Carga por ru	3000	2750	2750	Kg
q	7.14	7.14	7.14	Kg/cm <sup>2</sup>
	11.56	11.07	11.07	cm
S	-	33.21	-	cm
S/2	-	16.605	-	cm
A	419.82	384.99	384.99	cm <sup>2</sup>

Fuente: Autores.

Como se observa en la Tabla 2, los únicos datos constantes para cada tipo de eje es la presión de contacto ya que se toma como estándar para cada llanta. Los demás datos dependen directamente

de la carga por llanta, dependiente de la carga por eje.

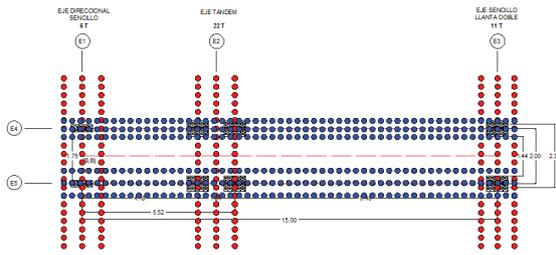
Con los datos completos del vehículo de estudio y con el plano cartesiano donde se ubicó cada uno de los platos de carga con las distancias obtenidas de la medición del vehículo mostradas en la Figura 3, se determina las coordenadas de cada neumático para su correspondiente modelación como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Coordenadas de platos de carga.

Ej	Plato No.	Coordenadas	
		X [cm]	Y [cm]
Direccional 2	1	0	-100
	0	100	
Eje 1	1	418	-116
	2	418	-85
	3	418	85
	4	418	116
Tándem	1	552	-116
	2	552	-85
	3	552	85
	4	552	116
Sencillo Trasero	1	1500	-116
	2	1500	-85
	3	1500	85
	4	1500	116

Fuente: Autores.

A partir de estos puntos que son los principales, se determina los demás puntos de análisis que están entre ejes y fuera de los ejes; los cuales, permiten mirar el comportamiento completo de la deflexión en toda el área implicada por el posicionamiento del vehículo y un área de influencia más allá de esos límites del mismo.



**Figura 5.** Puntos de análisis.  
Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Figura 5, con el plano creado inicialmente del vehículo con la ubicación de cada uno de los platos de carga que componen cada eje, se determinan los puntos de análisis que; para el presente estudio, corresponden a 677 con la finalidad de mirar muy bien el comportamiento de la deflexión longitudinal y transversalmente.

### 2) Modelo propuesto

Como estructura de análisis, se define una modelo de pavimento flexible de 4 capas compuesto de una carpeta asfáltica de 8 cm de espesor y un módulo dinámico de 50,000 kg/cm<sup>2</sup>; una base granular de 20 cm de espesor y un módulo resiliente de 1,955 kg/cm<sup>2</sup>; una subbase granular de 25 cm de espesor y un módulo resiliente de 1,068 kg/cm<sup>2</sup> y una subrasante con un módulo resiliente de 350 kg/cm<sup>2</sup>.

Espesores			Módulo	MODULOS		
h [pulg]	h [m]	h [cm]		E [kg/cm <sup>2</sup> ]	E [Mpa]	E [lb/pulg <sup>2</sup> ]
3.150	0.08	8	MDC - 19	50000	4902.00	714286
7.874	0.2	20	BG - 38	1955	192.00	27929
9.843	0.25	25	SBG - 50	1068	105.00	15257
Σ = 20.867	0.53	53	SR	350	34.00	5000

CBR [%] = 3.5

**Figura 6.** Modelo propuesto de pavimento flexible.  
Fuente: Autores.

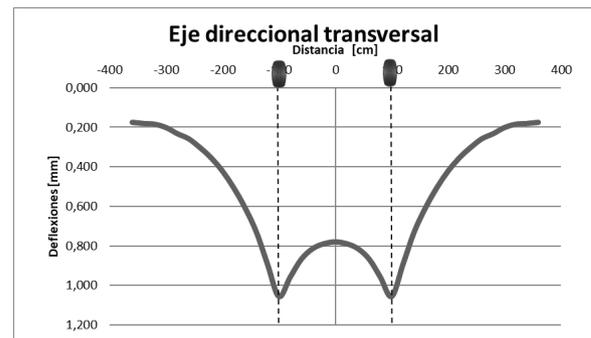
### 3) Modelación

En la modelación es necesario encontrar un software de diseño de pavimentos que permita obtener los resultados de deflexión de la manera más rápida y eficaz posible. Hay programas como Bisar 3.0, Pitra, WinJULEA, entre otros, que permiten la modelación de ejes completos; el más rápido y el usado en este proyecto es WinJULEA. Este programa permite la modelación de ejes en cualquier posición creando un plano cartesiano propio; modela hasta 100 puntos en una sola corrida y la extracción de los datos es muy rápida y fácil.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al modelar, procesar y organizar los datos de deflexión obtenidos en WinJULEA, se obtienen los siguientes cuencos de deflexión.

#### A) Cuencos de deflexión transversales.



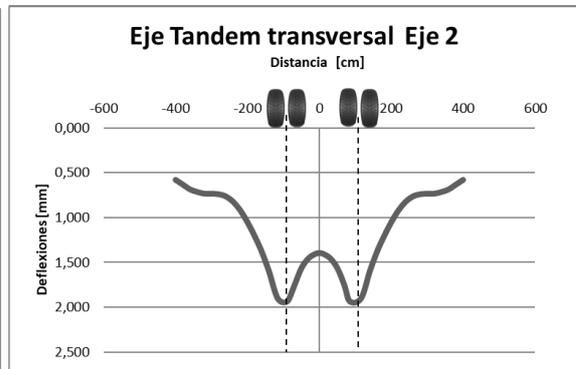
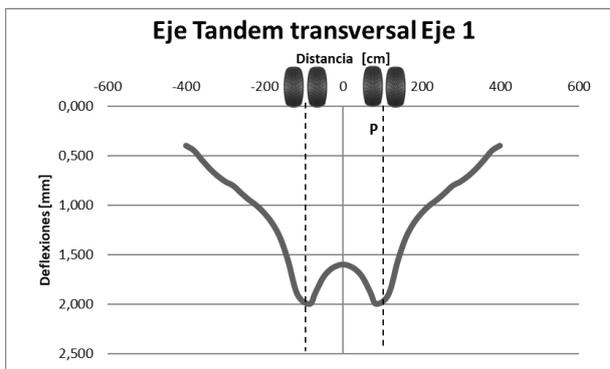
**Figura 7.** Cuenco de deflexión transversal - Eje direccional.  
Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Figura 7, se muestra el cuenco de deflexión del eje direccional que lleva una carga

de 6 toneladas como máximo según la Resolución 4100 de 2004; que por cada plato de carga (2), tiene una carga de 3 toneladas. Se deduce que la mayor deflexión de 1.054 mm se presenta debajo de cada plato de carga o punto de aplicación de la misma, disminuyendo al alejarse hacia los extremos hasta dar una tendencia aproximadamente asintótica; en el centro de los platos de

carga, disminuye hasta llegar a un punto de inflexión donde comienza a aumentar hasta llegar al plato de carga.

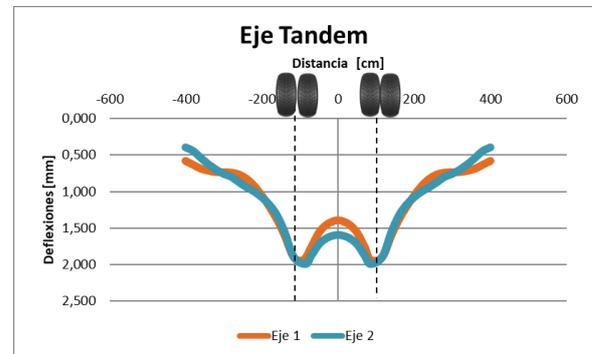
Como se indica en la Figura 8, los cuencos de deflexión de eje 1 y 2 del eje tándem son muy parecidos teniendo el mismo comportamiento entre ellos y similares con el cuenco de deflexión del eje direccional.



**Figura 8.** Cuenco de deflexión transversal - Eje tándem.  
Fuente: Autores.

Los picos indican la deflexión máxima de 1.996 mm que se ubica por debajo de los platos de aplicación de carga, disminuyen hacia los extremos y tienen un punto de inflexión en el centro de los dos platos de carga que es el valor mínimo de deflexión en ese punto.

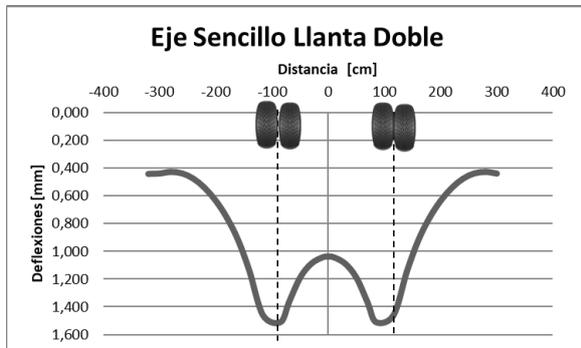
Para mirar la similitud de cuenco en cada uno de sus dos ejes, se contraponen de manera tal que se puedan ver sus diferencias en magnitudes de deflexión.



**Figura 9.** Cuenco de deflexión transversal conjugado - Eje tándem.  
Fuente: Autores.

En la Figura 9, se puede ver que a la diferencia entre los dos cuencos de deflexión es muy mínima, por lo que se deduce que ambos tienen el mismo comportamiento y magnitudes de deflexión muy similares entre ellas.

La Figura 10 muestra el cuenco de deflexión del eje sencillo de llanta doble.

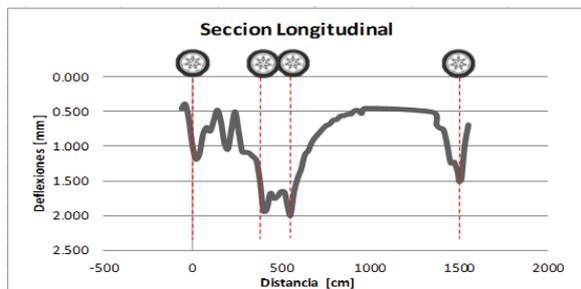


**Figura 10.** Cuenco de deflexión transversal - Eje sencillo trasero.

Fuente: Autores.

## B) Cuenco de deflexión longitudinal.

Para los cuencos de deflexión longitudinales, es necesario modelar todos los ejes, con lo cual se obtiene la Figura 11.



**Figura 11.** Cuenco de deflexión longitudinal.

Fuente: Autores.

En la Figura 11, se puede ver que el eje que produce mayor deflexión de 2 mm es el tándem, siendo este el de mayor carga por eje provocando un mayor daño en el pavimento. En cada uno de los cuencos por cada uno de los tres ejes, la mayor deflexión se produce debajo de cada plato de carga y disminuye al momento de alejarse del plato de carga y vuelve

aumentar si se encuentra cerca de otro plato de carga creando los puntos de inflexión entre puntos de carga.

Viendo las magnitudes de las deflexiones, la de menor magnitud es el eje direccional con 1.189 mm ya que recibe menos peso por eje en comparación con el eje sencillo trasero que maneja doble llana y recibe casi el doble de carga (11 t) generando una deflexión de 1.512 mm; y el de mayor magnitud el tándem con 2 mm.

Cabe aclarar que este mismo cuenco, es para ambos ejes E4 y E5 y para las 4 filas de análisis que se usaron ya que poseen las mismas magnitudes. Es simétrico y al serlo, se puede resumir todo en una sola gráfica. De la misma manera, se tienen las mismas magnitudes si se mira en el centro del eje tándem o en el centro del eje direccional.

Un dato a resaltar, son los tres puntos de inflexión existentes entre el eje direccional y el tándem. A simple vista y por deducción, se puede decir que esas inflexiones se crean por la cercanía de los ejes ya que su distancia de separación apenas es de 5 m, lo que genera una unión de bulbos de esfuerzos entre estos dos ejes creando un punto donde se suman las deflexiones llegando a una magnitud mayor de 1 mm como si se estuviera aplicando una carga directamente allí.

En este sentido hay que tener especial cuidado ya que se ve que la interposición de bulbos está creando nuevos puntos de "carga" que afecta en mayor magnitud el pavimento, demostrando que esta

afectación mayor no solo se produce únicamente debajo de los platos de carga sino también en lugares donde existe unión de bulbos. Punto que es de mucha importancia investigar más a fondo.

### C) Cuencos 3D

Para el análisis general y detallado de este estudio, se realiza la modelación en

3D de cada uno de los cuencos donde se puede evidenciar de mejor manera la magnitud de las deflexiones sobre el pavimento. Se usa el programa NCSS 2020 que proporciona a los investigadores, investigadores, académicos, científicos y otros profesionales un software estadístico de calidad que es completo y preciso, pero aún intuitivo y fácil de usar. reconocido por su precisión, facilidad de uso, excelencia gráfica y asequibilidad.

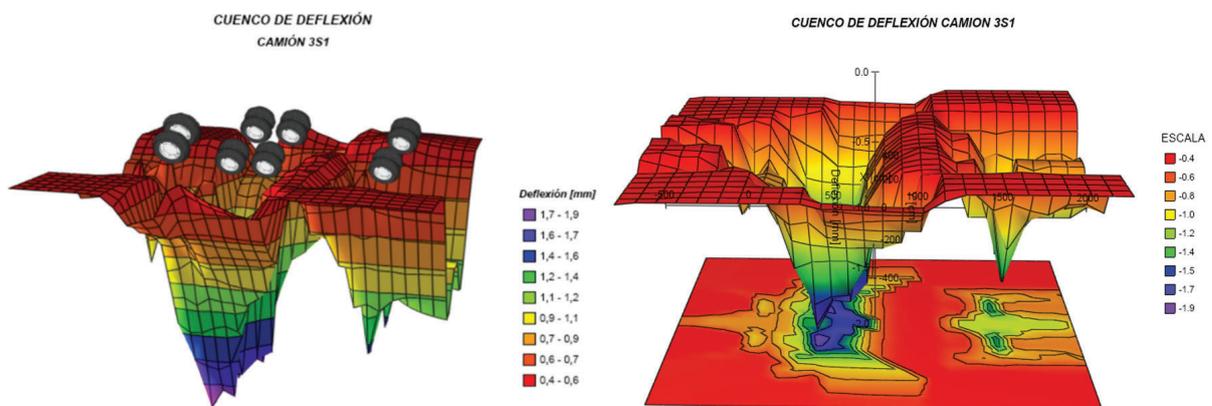
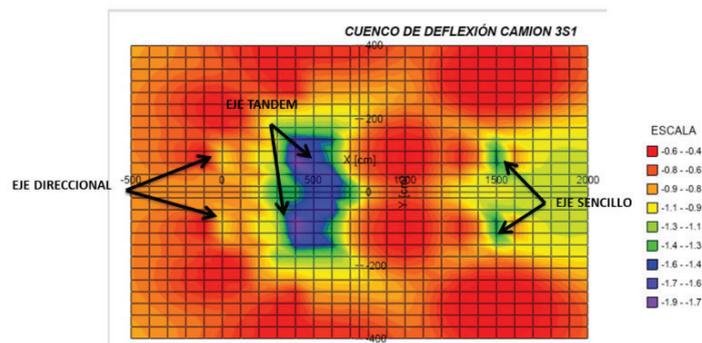


Figura 12. Cuenco de deflexión Total 3D.  
Fuente: Autores.

En la Figura 12, se puede observar la configuración del camión 3S1 y el daño en deflexión que le provoca al pavimento. Se puede ver de manera más clara que el eje que produce más daños es el tándem, seguido del eje sencillo de 4 llantas y por último el eje direccional. Cada uno de estos ejes, proporcionan un cuenco de deflexión cóncavo con el cual tiene su punto de mayor magnitud en los puntos donde se aplica la carga; este valor va disminuyendo de forma ascendente al alejarse del plato de carga. Si esta

tendencia encuentra cerca un plato de carga, se forma un punto de inflexión en el que vuelve a aumentar la deflexión hasta encontrar el siguiente plato de carga.

En la Figura 13, se puede observar los bulbos que forman las deflexiones mostrándose la forma y la incidencia de cada tipo de eje del vehículo de estudio; se ve el alcance y la contraposición de los mismos por las distancias que abarcan las deflexiones.



**Figura 13.** Cuenco de deflexión Total 2D – Curvas de nivel.  
Fuente: Autores.

#### IV. CONCLUSIONES

El cuenco de deflexión es un parámetro muy importante en la evaluación de pavimentos ya que hace parte de la mecánica que permite ver y encontrar el comportamiento del mismo frente a cargas de tránsito en diferentes configuraciones de ejes por tipos de vehículos. Esto permite realizar un análisis exhaustivo de la forma de los cuencos y la incidencia de estos en el pavimento nuevo y existente ya que representa la capacidad estructural permitiendo ser base de soluciones a planes de diseño, rehabilitación, mantenimiento, reconstrucción etc.

Al hallar la magnitud de las deflexiones encontrando directamente los bulbos que se forman por tipo de eje, permite ver que la incidencia que este tiene frente a las deflexiones y el alcance en la superficie del pavimento es mayor a la magnitud del vehículo, pues no se presenta solo en el área del vehículo de estudio si no que son cuencos con pendientes fuertes que se disminuyen o disipan a medida que se aleja de los platos de carga; por

lo que esta disminución de magnitudes de deflexiones, se extienden a más de 1 metro de los platos de carga aumentando el área de afectación del pavimento.

Los valores máximos de deflexión encontrados corresponden a 1.054 mm para el eje direccional, 1.996 mm para el eje tándem y 1.512 mm para el eje sencillo de llanta doble. Valores que corresponden a los cuencos de deflexión transversales que concuerdan con el cuenco longitudinal en cuanto a magnitud; donde se puede apreciar la incidencia de la carga del eje direccional con respecto al eje tándem creando puntos críticos adicionales en la zona intermedia entre los ejes.

Este análisis de cuencos de deflexión, permite otorgar al diseño de estructura de pavimentos flexibles una mayor visión del comportamiento mecánico de la estructura frente a las cargas estáticas del tránsito; sin embargo, se puede ampliar considerando la no linealidad de los materiales que componen una estructura de pavimento flexible como puede ser la viscoelasticidad para la

carpeta asfáltica y la elastoplasticidad para las capas granulares y la subrasante. Así mismo se puede introducir un rango de velocidad dentro del análisis mirando el comportamiento y la respuesta de la estructura, simulando de manera más cercana a la realidad el paso de los vehículos y el daño que estos producen.

## V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por el apoyo brindado para la realización de la presente investigación.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Bahrani, N., Blanc, J., Hornych, P., & Menant, F. (2019). Pavement instrumentation for condition assessment using eficiente sensing solutions. *Ice publishing*. 471-480 <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.471>. (Bahrani, Hornych & Menant, 2019)
- [2] Bahrani, N., Blanc, J., Hornych, P., & Menant, F. (2020). Alternate Method of Pavement Assessment Using Geophones and Accelerometers for Measuring the Pavement Response. *Infrastructures*, 5(3), 25. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030025>.
- [3] Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L., & Duhamel, D. (2010). ViscoRoute 2.0 A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 11(2), 227-250. <https://doi.org/10.3166/rmpd.11.227-250>. (Chabot, Chupin, Deloffre & Duhamel, 2010)
- [4] Chai, G., Manoharan, S., Golding, A., Kelly, G., & Chowdhury, S. (2016). Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model. *Transportation Research Procedia*, 14, 3031-3039. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.444>. (Chai, Golding, Kelly & Chowdhry, 2016)
- [5] Daniel, L. S., Kortiš, J., Decký, M., Pisca, P., & Fabo, P. (2018). Development of the FEM wheel-soil model for the design of flexible pavements. *MATEC Web of Conferences*, 196, 01012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601012>.
- [6] De Beer, M., Fisher, C., & Kannemeyer, L. (2004, septiembre). Tyre-pavement interface contact stresses on flexible pavements. Presentado en 8a Conference on asphalt pavements for southern africa, Sun City, South Africa: Documents Transformations Technologies cc. (Beer, Fisher & Kannemeyer, 2004).
- [7] Elbagalati, O., Elseifi, M. A., Gaspard, K., & Zhang, Z. (2017). Development of an artificial neural network model to predict subgrade resilient modulus from continuous deflection testing. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(9), 700-706. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0132>. (Elbagalati, Elseifi, Gaspard & Zhang, 2017)
- [8] Higuera, C. (Ed.). (2010). Principios básicos de estructuras de pavimentos. En *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras* (1.a ed., Vol. 1, pp. 1-44). Tunja, Colombia: Uptc.

- [9] Higuera, C. (2006). Los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles. *Revista facultad de ingeniería, UPTC*. 15(20), 21-31.
- [10] Huang, Y. (2003). *Pavement Analysis and Design (2nd Revised ed.)*. New Jersey, United States of America: Pearson.
- [11] Ministerio de transporte. (2004). Resolución 4100 (pp. 2-8). Bogotá.
- [12] Mshali, M. R. S., & Steyn, W. J. (2019). Incorporating truck speed effect on evaluation and design of flexible pavement systems. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(1), 55-63. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0085-1>. (Mshali & Steyn, 2019)
- [13] Nega, A., Nikraz, H., & Al-Qadi, I. L. (2016). Dynamic analysis of falling weight deflectometer. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5), 427-437. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.010>. (Nega, Nikraz, & Al-Qadi, 2016)
- [14] Prastyanto, C. A., & Mochtar, I. B. (2017). Prediction of Flexible Pavement Deflection Based on Falling Weight Deflectometer, FWD, for Highways Traversed by Heavy Overloaded Vehicles (Case Study on Arterial and Collector Roads in Tuban, East Java, Indonesia). *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 3(6), 647-651. <https://doi.org/10.12962/j23546026.y2017i6.3316>.
- [15] Rashid, Z. A., & Ahmed, B. A. A. (2019). Data Processing, Storage, and Analysis: Applying Computational Procedures to the Case of a Falling Weight Deflectometer (FWD). *Journal of Physics: Conference Series*, 1362, 012145. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1362/1/012145>.
- [16] Tarefder, R. A., & Ahmed, M. U. (2014). Modeling of the FWD Deflection Basin to Evaluate Airport Pavements. *International Journal of Geomechanics*, 14(2), 205-213. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000305](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000305).
- [17] Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design (2nd Revised ed.)*. New York, United States of America: Wiley.
- Brave, R. (2001, December 10). *Governing the genome*. Retrieved June 12, 2001.