

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El crecimiento urbano y el aumento sostenido del parque automotor en el departamento de Tarija han intensificado la problemática ambiental asociada a la generación y modelación de las emisiones de polvo en vías no pavimentadas.

En el caso del municipio de Tarija, una parte considerable de su red vial está conformada por caminos no pavimentados, los cuales representan una fuente difusa importante de emisión de polvo (PM_{10}) debido a la circulación vehicular sobre superficies de suelo seco y con alto contenido de partículas finas.

La generación y Re suspensión de polvo por el tránsito vehicular constituye una de las principales causas del deterioro de la calidad del aire en zonas urbanas y periurbanas. Dicho fenómeno no solo afecta la visibilidad y la infraestructura, sino que también tiene repercusiones en la salud pública, ya que las partículas inhalables (PM_{10}) pueden penetrar en el sistema respiratorio y causar enfermedades crónicas, especialmente en poblaciones vulnerables.

En el contexto de Tarija, caracterizado por un clima semiárido, la escasa precipitación y los largos periodos secos favorecen la dispersión del material particulado. La falta de pavimentación, el deficiente mantenimiento vial y el incremento del tránsito diario potencian este problema, generando niveles de polvo que frecuentemente superan los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y la Ley N.º 1333 del Medio Ambiente (Bolivia, 1992).

Frente a esta situación, resulta fundamental cuantificar las emisiones de polvo generadas por el tránsito vehicular con el fin de evaluar su impacto y proponer medidas de mitigación. En este sentido, el modelo AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2020) constituye una herramienta ampliamente utilizada a nivel internacional para la estimación de emisiones de material particulado en vías no

pavimentadas, considerando variables como el volumen promedio diario (VPD), la velocidad de operación (V_{85}), el peso vehicular promedio (W_{prom}) y el contenido de finos del suelo.

Sin embargo, los factores de emisión del modelo AP-42 fueron desarrollados bajo condiciones climáticas, texturales y operativas distintas a las de Tarija, por lo que su aplicación directa puede conducir a resultados poco representativos. Por ello, se requiere analizar, calibrar y validar el modelo a partir de datos obtenidos localmente, de manera que se ajuste a las características reales del tránsito y del suelo.

La presente investigación se orienta a la modelación de las emisiones de polvo en vías no pavimentadas, mediante la aplicación y calibración del modelo AP-42 con base en mediciones experimentales de PM_{10} realizadas con el equipo MiniVol TAS, además de la caracterización física de los suelos y del aforo vehicular en treinta tramos representativos de la red vial de Tarija.

El estudio busca establecer un factor de calibración local (K_{opt}) que permita estimar con mayor precisión las emisiones y concentraciones de PM_{10} en función de las condiciones específicas de la región. De esta manera, la investigación contribuye al análisis, evaluación y control de las emisiones de polvo en vías no pavimentadas, fortaleciendo la gestión ambiental urbana y el desarrollo sostenible del municipio de Tarija.

1.2. Justificación

La contaminación atmosférica causada por el material particulado (PM_{10}) constituye uno de los principales problemas ambientales en las ciudades que presentan una amplia proporción de vías sin pavimentar. En el municipio de Tarija, las condiciones climáticas semiáridas, sumadas al incremento del tránsito vehicular, intensifican la generación y re suspensión de polvo, afectando de manera directa la calidad del aire y la salud de la población.

La ausencia de pavimento en gran parte de la red vial urbana y periurbana propicia emisiones continuas de partículas finas durante la circulación vehicular, especialmente en la época seca. Estas emisiones no solo deterioran la calidad del aire, sino que también

reducen la visibilidad, aceleran el desgaste de la infraestructura y aumentan los costos de mantenimiento vial.

En este contexto, la cuantificación precisa de las emisiones de polvo se vuelve un aspecto esencial para la gestión ambiental y la planificación territorial del municipio. No obstante, las autoridades locales no cuentan con factores de emisión calibrados ni con modelos que se ajusten a las condiciones reales de los caminos no pavimentados de Tarija.

El modelo AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2020) es una herramienta ampliamente utilizada para estimar las emisiones de material particulado en vías sin tratamiento superficial. Sin embargo, sus factores de emisión fueron desarrollados a partir de estudios realizados en contextos diferentes, por lo que su aplicación directa en Bolivia podría generar errores significativos en la estimación de emisiones.

Por esta razón, resulta fundamental calibrar y validar localmente el modelo AP-42, utilizando datos experimentales obtenidos en campo a partir de mediciones de PM_{10} con el equipo MiniVol TAS, la caracterización granulométrica de los suelos, y los aforos vehiculares realizados en treinta tramos representativos. De este modo, se busca determinar un factor de calibración local (K_{opt}) que refleje las condiciones reales de la región.

El desarrollo de este estudio permitirá adaptar un modelo internacional a las condiciones específicas del municipio de Tarija, generando una herramienta técnica confiable para la evaluación de emisiones en caminos no pavimentados. Asimismo, los resultados servirán de base para diseñar estrategias de mitigación, tales como el control de velocidad, el riego periódico o la estabilización superficial, contribuyendo a reducir la contaminación por polvo y mejorar la calidad del aire.

1.3. Planteamiento Del Problema

1.3.1. Situación Problemática

En el municipio de Tarija, gran parte de la red vial urbana y periurbana está conformada por caminos no pavimentados que, debido al tránsito constante de vehículos, generan altos

niveles de polvo suspendido en el ambiente. Este material particulado, conocido como PM_{10} , afecta directamente la calidad del aire, la salud de la población y el deterioro de la infraestructura urbana.

Durante la época seca, cuando las precipitaciones son escasas y los niveles de humedad superficial son bajos, la re suspensión de partículas finas del suelo se incrementa, generando concentraciones que superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y la Ley N.º 1333 del Medio Ambiente (Bolivia, 1992).

A pesar de la magnitud del problema, no existen estudios locales actualizados que cuantifiquen las emisiones de material particulado ni herramientas técnicas que permitan estimar de forma precisa las emisiones de polvo en las vías no pavimentadas del municipio.

El modelo AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2020) es ampliamente utilizado a nivel internacional para la estimación de emisiones de material particulado; sin embargo, sus factores de emisión fueron desarrollados en contextos climáticos y operativos diferentes, por lo que su aplicación directa en Tarija puede generar errores significativos de estimación.

Por otra parte, el municipio carece de datos experimentales sistemáticos de concentración de PM_{10} y de factores de calibración locales (K) que reflejen las condiciones reales del tránsito y del suelo. Esta carencia limita la capacidad de las autoridades para diagnosticar, planificar y controlar la contaminación por polvo en las zonas más afectadas.

En consecuencia, es necesario analizar y calibrar el modelo AP-42 bajo las condiciones específicas del municipio de Tarija, utilizando mediciones reales de PM_{10} con el MiniVol TAS, datos de tránsito y características físicas de los suelos, a fin de desarrollar un modelo ajustado a la realidad local que sirva de herramienta técnica para la gestión ambiental y la toma de decisiones municipales.

1.3.2. Problema

¿Cómo puede analizarse la modelación de las emisiones de polvo generadas por el tránsito vehicular en vías no pavimentadas, aplicando el modelo AP-42 a las condiciones

específicas de las vías de Tarija, para estimar con mayor precisión las concentraciones de material particulado (PM_{10}) y apoyar la gestión ambiental local?

1.3.3. Relevancia Y Factibilidad Del Problema

El presente estudio es de alta relevancia para la ingeniería civil y ambiental, ya que analiza las emisiones de polvo generadas por el tránsito vehicular en vías no pavimentadas, una problemática que afecta tanto la durabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial como la calidad del aire y la salud pública en el departamento de Tarija.

El proyecto aplica y calibra el modelo AP-42 de la EPA (1995) bajo condiciones locales, permitiendo cuantificar de manera precisa las emisiones de material particulado (PM_{10}) y establecer un factor de calibración local (K_{opt}) útil para la gestión y mantenimiento de caminos. Este aporte fortalece la planificación vial y ambiental, al brindar una herramienta técnica aplicable a programas de control de polvo y priorización de pavimentación.

La investigación es factible técnica y metodológicamente, al sustentarse en mediciones experimentales con el equipo MiniVol TAS, ensayos de suelos y aforos vehiculares, complementados con información meteorológica y recursos locales disponibles. En conjunto, estos elementos garantizan la viabilidad y aplicabilidad práctica de los resultados dentro del ámbito de la ingeniería civil.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar las emisiones de polvo (PM_{10}) en vías no pavimentadas de Tarija, aplicando mediciones experimentales y modelos de estimación para evaluar la influencia de las condiciones de suelo y tránsito, con el propósito de generar información técnica que permita mejorar la gestión ambiental y la planificación vial.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los suelos superficiales de los tramos estudiados.

- Registrar las condiciones operativas del tránsito (V85, VPD y peso promedio vehicular) en los tramos evaluados.
- Medir experimentalmente las concentraciones de PM_{10} mediante el equipo MiniVol TAS durante la temporada seca en la ciudad de Tarija.
- Aplicar el modelo AP-42 para estimar las emisiones de PM_{10} , en los tramos seleccionados.
- Calibrar el modelo AP-42 mediante análisis estadístico, obteniendo el factor local de corrección (K_{opt}) aplicable a la ciudad de Tarija.
- Evaluar la relación entre las emisiones generadas y las variables analizadas: porcentaje de finos, velocidad vehicular, volumen de tránsito (VPD) y peso promedio del vehículo.
- Proponer lineamientos técnicos y estrategias de control que contribuyan a la reducción de emisiones y al mejoramiento de la gestión vial y ambiental en las vías de Tarija.

1.5. Hipótesis

"Las emisiones de PM_{10} generadas en vías no pavimentadas de Tarija aumentan significativamente en función de las características del suelo (contenido de finos y humedad) y de la intensidad del tránsito vehicular, pudiendo ser estimadas con mayor precisión mediante la calibración del modelo AP-42 a partir de mediciones experimentales."

1.6. Operacionalización De Las Variables

1.6.1. Variables Independientes

Tabla 1.1. Variables Independientes

Tipo de variable	Nombre de la variable	Definición conceptual	Unidad de medida
Variable independiente	Volumen promedio diario vehicular (VPD)	Cantidad promedio de vehículos que transitan por un tramo vial en 24 horas.	veh/día
	Velocidad de operación vehicular (V_{85})	Velocidad que no supera el 85 % de los conductores bajo condiciones libres de congestión.	km/h
	Contenido de finos del suelo	Porcentaje de partículas que pasan el tamiz N°200 (0,075 mm).	%
	Peso promedio vehicular (W_{prom})	Masa promedio de los vehículos que circulan por un tramo vial.	toneladas

Fuente: Elaboración Propia

1.6.2. Variables Dependientes

Tabla 1.2. Variables Dependientes

Tipo de variable	Nombre de la variable	Definición conceptual	Unidad de medida
Variable dependiente	Concentración de material particulado (PM_{10})	Masa total de partículas con diámetro $\leq 10 \mu m$ presentes en el aire, generadas por la suspensión de polvo en caminos no pavimentados.	$\mu g/m^3$

Fuente: Elaboración Propia

1.7. Identificación Del Tipo De Investigación

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, ya que utiliza fundamentos teóricos y métodos técnicos para resolver un problema real relacionado con las emisiones de polvo (PM_{10}) generadas por el tránsito vehicular en vías no pavimentadas del departamento de Tarija, mediante la calibración y validación del modelo AP-42 de la EPA.

Por su nivel, la investigación es explicativa–correlacional, porque busca determinar la relación entre variables físicas y operativas, como el volumen de tránsito, la velocidad vehicular, el contenido de finos del suelo y las concentraciones de PM_{10} , explicando cómo influyen en la generación de polvo.

En cuanto a su enfoque, es cuantitativa, pues se basa en la recolección y análisis numérico de datos experimentales y estadísticos para validar el modelo.

De acuerdo con su diseño, es una investigación no experimental, de campo y transversal: se observan las variables en su entorno natural, se obtienen los datos directamente en los tramos seleccionados y el estudio se desarrolla en un periodo específico representativo de la época seca.

Finalmente, se enmarca dentro de la ingeniería civil con aplicación ambiental, integrando el análisis vial, la caracterización de suelos y la modelación de emisiones atmosféricas para apoyar la gestión técnica y ambiental de la red vial.

1.7.1. Selección De Las Técnicas De Muestreo

La investigación empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, seleccionando tramos viales no pavimentadas de la ciudad de Tarija. Los puntos fueron escogidos considerando la intensidad de tráfico vehicular, el contenido de finos del suelo, y las condiciones geométricas y ambientales de cada sector.

Las mediciones de PM_{10} se realizaron mediante muestreo ambiental puntual y temporal utilizando el equipo MiniVol TAS, con periodos de 12 horas durante la época seca, bajo condiciones meteorológicas estables.

Los aforos vehiculares y las velocidades de operación (V_{85}) se determinaron mediante conteo directo y radar de velocidad en los mismos tramos de estudio.

Estas técnicas de muestreo permitieron obtener datos confiables y representativos para el análisis, modelación y calibración del modelo AP-42 bajo las condiciones locales de Tarija.

1.8. Métodos Y Técnicas Empleadas

1.8.1. Métodos

El estudio se desarrolló bajo el método científico, aplicando procedimientos cuantitativos, analíticos y experimentales para evaluar las emisiones de polvo (PM_{10}) en vías no pavimentadas del departamento de Tarija.

Se utilizaron los siguientes métodos:

- Método experimental: para la medición directa de PM_{10} en campo mediante el equipo MiniVol TAS, obteniendo concentraciones promedio en distintos tramos viales.
- Método analítico: para la caracterización granulométrica del suelo, determinando el porcentaje de material fino que influye en la generación de polvo.
- Método estadístico: para el procesamiento y análisis de datos, empleando correlaciones, regresiones y cálculo del factor de calibración local (K_{opt}) en la validación del modelo AP-42.
- Método descriptivo: para la clasificación de las vías, identificación de condiciones superficiales y análisis comparativo entre zonas urbanas y periurbanas.

1.8.2. Técnicas

Entre las técnicas empleadas se incluyen:

- Muestreo ambiental puntual y temporal con el MiniVol TAS para la determinación de PM_{10} .
- Aforos vehiculares manuales para determinar el VPD (vehículos/día).
- Medición de velocidades mediante radar portátil, para obtener el V_{85} .
- Ensayos de laboratorio (tamizado) para la determinación del contenido de finos.
- Procesamiento estadístico con herramientas informáticas para el ajuste y validación del modelo AP-42.

1.8.3. Tratamiento Estadístico

El tratamiento estadístico de los datos se realizó siguiendo un enfoque cuantitativo y analítico, con el propósito de evaluar las relaciones entre las variables medidas y validar la calibración del modelo AP-42 bajo las condiciones locales del departamento de Tarija.

En primera instancia, los datos obtenidos de PM₁₀, VPD, velocidad vehicular (V₈₅), peso promedio vehicular (W_{prom}) y contenido de finos del suelo fueron organizados en tablas y procesados mediante estadística descriptiva, determinando valores de promedio, desviación estándar, valores máximos y mínimos.

Media

En matemáticas y estadística una media o promedio es una medida de tendencia central. Resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números y que, en determinadas condiciones, puede representar por sí solo a todo el conjunto. La media aritmética es un promedio estándar que a menudo se denomina "promedio". Se calcula con la fórmula:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Donde

n=Número de datos

X_i= Conjunto de datos

Desviación estándar

La desviación típica es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas, nos dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en una distribución de datos, mientras mayor sea el valor de la desviación, se interpreta que los datos están más dispersos. Se calcula la desviación estándar de la siguiente manera:

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

Donde

n= Número de datos

X_i = Conjunto de datos

$\bar{X}$ = Media

Varianza

La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media. Formalmente se calcula como la suma de los residuos al cuadrado divididos entre el total de observaciones. La unidad de medida de la varianza será siempre la unidad de medida correspondiente a los datos, pero elevada al cuadrado. La varianza siempre es mayor o igual que cero, y es la desviación típica elevada al cuadrado, se calcula con la formula siguiente:

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

Donde

n= Número de datos

X_i = Conjunto de datos

$\bar{X}$ = Media

Coefficiente de variación

El coeficiente de variación es la relación entre la desviación típica de una muestra y su media, permite comparar las dispersiones de dos distribuciones distintas, siempre que sus medias sean positivas. Se calcula para cada una de las distribuciones y los valores que se obtienen se comparan entre sí.

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{X}|}$$

Donde

σ =Desviación

$\bar{X}$ = Media

Posteriormente, se aplicaron análisis de correlación lineal (r de Pearson) para identificar el grado de asociación entre las variables físicas y operativas con las concentraciones de PM₁₀.

Asimismo, se efectuó un ajuste por regresión lineal entre los valores medidos y los estimados por el modelo AP-42, obteniendo el factor de calibración local (K_{opt}).

La validación estadística del modelo se evaluó mediante los siguientes indicadores:

Coefficiente de determinación (R²): mide la capacidad del modelo para explicar la variabilidad de los datos.

Error cuadrático medio (RMSE): cuantifica la diferencia promedio entre los valores observados y estimados.

Error porcentual absoluto medio (MAPE): evalúa la precisión relativa del modelo.

Sesgo medio (Bias): determina la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar los resultados.

1.9. Alcance De La Investigación

La presente investigación posee un alcance descriptivo, explicativo y aplicado, orientado a analizar y modelar las emisiones de polvo (PM₁₀) generadas por el tránsito vehicular en vías no pavimentadas que forman parte de la ciudad de Tarija, concentrándose específicamente en una sección representativa dentro del ámbito urbano y periurbano del municipio de Tarija.

El estudio no abarca la totalidad de las vías, sino un conjunto de barrios y tramos seleccionados que presentan características físicas y operativas similares a las

predominantes en el resto del sistema vial no pavimentado del departamento. Estos sectores fueron elegidos por criterios técnicos que incluyen el nivel de tráfico vehicular, el tipo de suelo, el porcentaje de material fino, las condiciones geométricas del camino y la accesibilidad para la instalación de equipos y toma de datos.

El alcance comprende la medición experimental de concentraciones de PM_{10} mediante el equipo MiniVol TAS, la caracterización física de los suelos a través de ensayos granulométricos, y la obtención de variables operativas como el volumen promedio diario vehicular (VPD), la velocidad de operación (V_{85}) medida con radar y el peso promedio vehicular (W_{prom}).

Con base en estos parámetros, se procede a la aplicación, calibración y validación del modelo AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), con el fin de obtener un factor de calibración local (K_{opt}) que permita adaptar el modelo a las condiciones propias de Tarija.

Los resultados permitirán evaluar la aplicabilidad del modelo calibrado en condiciones locales y generar parámetros técnicos replicables en otras zonas del departamento, contribuyendo al diseño de estrategias de mitigación del polvo, priorización de pavimentación y control de emisiones. Asimismo, el estudio servirá como base metodológica para futuras investigaciones relacionadas con la gestión vial y ambiental de vías no pavimentados en Tarija y otras regiones con condiciones similares.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición Y Características Generales

Las vías no pavimentadas son aquellas cuya superficie de rodadura está conformada por materiales naturales o afirmados, como tierra, grava o ripio, sin recubrimiento rígido o flexible de asfalto o concreto. Estas superficies son comunes en áreas rurales y periurbanas, pero también forman parte importante de la infraestructura urbana en ciudades intermedias de América Latina. Su construcción suele ser de bajo costo y rápida ejecución, pero presentan desventajas relacionadas con la generación de polvo, formación de baches, pérdida de material fino y necesidad frecuente de mantenimiento (AASHTO, 2012).

En Bolivia, más del 70 % de la red vial departamental y municipal está constituida por vías no pavimentadas, debido a limitaciones económicas y a la topografía diversa del territorio (ABC, 2019). En el contexto urbano de Tarija, estudios preliminares señalan que cerca del 40 % de la red vial de la provincia Cercado aún corresponde a calles sin pavimento, lo cual genera problemas de accesibilidad, seguridad vial y, sobre todo, emisiones de polvo en suspensión en temporada seca (Ugarte, 2013).

2.2. Importancia Social Y Económica De Las Vías No Pavimentadas

Las calles no pavimentadas cumplen un papel social y económico importante, especialmente en barrios periféricos, al garantizar conectividad básica para el transporte de personas, bienes y servicios. En muchos casos, constituyen la única vía de acceso hacia comunidades o asentamientos urbanos de reciente formación, donde el pavimento aún no ha sido ejecutado. Su bajo costo inicial de construcción contrasta con los altos costos de mantenimiento y con los impactos ambientales que producen (Pereira et al., 2017).

En ciudades intermedias como Tarija, estas vías no solo son un elemento funcional, sino también un factor de inequidad social, ya que los barrios que permanecen sin pavimentar

tienden a ser los de menor nivel socioeconómico. La falta de pavimento repercute directamente en la calidad de vida de los habitantes: mayores niveles de polvo afectan la salud y la habitabilidad de las viviendas; las corrugaciones y baches deterioran los vehículos y aumentan los costos de transporte; y la acumulación de agua en lluvias limita la transitabilidad (Salini Calderón, 2017).

2.3. Condiciones Constructivas Y Degradación Superficial

El material superficial de las vías no pavimentadas es generalmente heterogéneo y contiene partículas gruesas (grava, arena) mezcladas con fracciones finas (limo, arcilla). Con el tránsito y la acción climática, estas partículas tienden a segregarse: las gruesas permanecen en la superficie, mientras que las finas son susceptibles de ser re suspendidas o arrastradas por el viento y el agua (EPA, 1995).

La falta de mantenimiento periódico (perfilado, riego o reposición de material) acelera la degradación, originando problemas típicos como:

- **Baches:** huecos producidos por el tráfico y la erosión hídrica.
- **Corrugaciones:** ondulaciones longitudinales por el paso repetitivo de vehículos.
- **Pérdida de material fino:** liberación de polvo a la atmósfera.

En Tarija, la temporada seca (mayo–septiembre) favorece la pérdida de material fino, mientras que en la temporada de lluvias (noviembre–marzo) se acentúa la erosión hídrica y la formación de baches, creando un ciclo de deterioro que requiere intervenciones frecuentes por parte de la municipalidad (Contraloría General del Estado, 2020).

2.4. Problemática Ambiental: Generación De Polvo

El principal impacto ambiental de las vías no pavimentadas es la generación de polvo, que se manifiesta como material particulado en suspensión (principalmente PM_{10} y $PM_{2.5}$). Este polvo es levantado por la acción mecánica de los neumáticos y la turbulencia del aire producida por los vehículos. Una vez en la atmósfera, las partículas se dispersan y afectan tanto a la población cercana como a la calidad ambiental urbana en general (EPA, 2000).

La magnitud de emisiones depende de factores físicos de la vía (contenido de finos, humedad), de factores operativos (peso y velocidad vehicular), y de condiciones climáticas (viento, temperatura, sequedad). La literatura técnica muestra que, en promedio, una vía no pavimentada puede emitir entre 2 y 10 gramos de PM_{10} por vehículo-kilómetro recorrido (g/VKT), dependiendo de estas condiciones (EPA, 1995; Kacer et al., 2024).

En barrios de Tarija, donde predominan calles de tierra con alto contenido de finos y tránsito mixto de motocicletas, vehículos livianos y camiones de reparto, la problemática del polvo es recurrente y constituye una queja constante de los vecinos (Ugarte, 2013).

2.5. Impactos En La Salud Y En La Vida Cotidiana

La exposición prolongada a partículas de polvo re suspendido tiene impactos comprobados en la salud respiratoria y cardiovascular. La Organización Mundial de la Salud ha identificado que la exposición a PM_{10} se asocia a un incremento en síntomas respiratorios, bronquitis crónica, reducción de la función pulmonar y mortalidad prematura en poblaciones vulnerables (OMS, 2021).

A nivel local, los habitantes de barrios sin pavimentar en Tarija sufren cotidianamente la presencia de polvo en viviendas, alimentos y espacios públicos, lo que incrementa enfermedades respiratorias, especialmente en niños y adultos mayores (Ugarte, 2013). Además, el polvo depositado en techos y suelos incrementa la necesidad de limpieza doméstica, deteriora bienes materiales y reduce la calidad de vida.

2.6. Contaminación Atmosférica Y Material Particulado

2.6.1. Concepto De Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de sustancias, partículas o compuestos en concentraciones que producen efectos adversos sobre la salud, el ambiente y los materiales. Estos contaminantes pueden ser de origen natural (erupciones volcánicas, tormentas de polvo, incendios forestales) o antropogénico (vehículos,

industrias, quema de biomasa). En el contexto urbano, las fuentes más relevantes son las emisiones vehiculares y las actividades industriales (Seinfeld & Pandis, 2016).

En Bolivia, la Ley 1333 establece que contaminación atmosférica es toda alteración de la composición natural del aire por agentes físicos, químicos o biológicos, en magnitudes que representen riesgo para la salud humana o el ambiente (Bolivia, 1992). Esto incluye tanto gases como partículas sólidas y líquidas en suspensión.

2.6.2. Contaminantes Criterio

A nivel internacional, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) reconocen a seis contaminantes “criterio”: material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb) (EPA, 2020; OMS, 2021).

De todos ellos, el material particulado es considerado el más crítico en países en desarrollo, debido a la falta de control vehicular y al uso intensivo de vías no pavimentadas, que constituyen una fuente directa de partículas gruesas y finas (Querol et al., 2019).

2.6.3. Material Particulado (PM_{10} Y $PM_{2.5}$): Definición Y Origen

El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) se refiere a una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Su clasificación depende del diámetro aerodinámico:

- PM_{10} : partículas con diámetro ≤ 10 micrómetros.
- $PM_{2.5}$: partículas con diámetro $\leq 2,5$ micrómetros (más finas y peligrosas).

El origen de estas partículas puede ser **primario** (emitidas directamente, como el polvo de caminos, cenizas, hollín) o **secundario** (formadas en la atmósfera por reacciones químicas de gases como SO_2 , NO_x o compuestos orgánicos volátiles) (WHO, 2021).

En vías no pavimentadas, la principal fracción emitida corresponde a PM_{10} , producto de la suspensión de polvo superficial, aunque también se generan partículas finas por combustión de motores (Kacer et al., 2024).

2.6.4. Efectos En La Salud Humana

Numerosos estudios epidemiológicos han confirmado la relación entre exposición a material particulado y el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La OMS (2021) estima que la exposición crónica a partículas finas y gruesas contribuye a millones de muertes prematuras cada año a nivel mundial.

La exposición a PM_{10} se asocia con irritación de vías respiratorias, tos, bronquitis crónica, agravamiento del asma y reducción de la función pulmonar. En el caso de $PM_{2.5}$, al ser partículas más pequeñas, penetran hasta los alvéolos pulmonares e incluso pueden entrar al torrente sanguíneo, aumentando el riesgo de infartos, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón (WHO, 2021; Dockery & Pope, 2006).

En Bolivia, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire (MoniCA) ha reportado que, en varias ciudades, incluido Tarija, los niveles de PM_{10} superan con frecuencia los límites normativos, generando preocupación por su impacto en la salud pública (SNIA, 2021).

2.6.5. Efectos En El Ambiente Y La Economía

El material particulado también tiene impactos ambientales. Una de las consecuencias más visibles es la reducción de la visibilidad (smog o neblina urbana), fenómeno común en áreas con alta carga de polvo (Seinfeld & Pandis, 2016). Además, las partículas se depositan sobre suelos, techos y cultivos, deteriorando infraestructuras, disminuyendo la productividad agrícola y aumentando los costos de mantenimiento urbano (Querol et al., 2019).

Desde el punto de vista económico, la contaminación atmosférica genera costos asociados a hospitalizaciones, pérdida de productividad laboral y daños materiales. El Banco Mundial (2016) estimó que la contaminación del aire representa hasta un 5 % del PIB en

países en desarrollo debido a estos costos indirectos. En Tarija, aunque no existen cálculos económicos específicos, se puede inferir que el polvo urbano de las vías no pavimentadas genera gastos adicionales en salud y mantenimiento para las familias y el municipio (Contraloría General del Estado, 2020).

2.6.6. Situación En Bolivia Y En Tarija

En Bolivia, el contaminante criterio que más frecuentemente supera los límites normativos es el material particulado (PM₁₀). Los informes del SNIA (2021) muestran que ciudades como La Paz, Cochabamba, Santa Cruz y Tarija han registrado valores sobre 150 µg/m³ en promedio de 24 horas en la época seca.

En Tarija, Ugarte (2013) encontró que en puntos urbanos de la Red MoniCA, los niveles de PM₁₀ alcanzaban picos de 180–200 µg/m³ en temporada seca, superando ampliamente los límites nacionales y de la OMS. Estos valores se asocian principalmente al polvo urbano, proveniente tanto del tránsito vehicular como de las calles no pavimentadas.

Esto confirma que el material particulado es la principal amenaza para la calidad del aire en Tarija, y que el polvo de las vías barriales constituye una fuente relevante de contaminación que debe ser estudiada de forma más detallada.

2.7. Normativas Internacionales Y Nacionales Sobre Calidad Del Aire

2.7.1. Estándares Internacionales: OMS, EPA Y La Unión Europea

A nivel global, la **Organización Mundial de la Salud (OMS)** estableció en 2021 nuevos valores guía para proteger la salud de la población frente a contaminantes atmosféricos. En el caso del PM₁₀, los valores recomendados son de 15 µg/m³ como promedio anual y 45 µg/m³ como promedio de 24 horas. Estos valores se basan en estudios epidemiológicos recientes que confirman la relación directa entre exposición a partículas y aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2021).

La **Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)**, en contraste, mantiene un estándar menos estricto: 150 µg/m³ como límite máximo de 24 horas para PM₁₀, y 50

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual. Este valor fue definido en la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) y ha sido utilizado como referencia en varios países en desarrollo, debido a que se considera más alcanzable en contextos urbanos con recursos limitados (EPA, 2020).

En la Unión Europea (UE), los límites establecidos en la Directiva 2008/50/CE sobre calidad del aire fijan un máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 horas (no más de 35 superaciones al año) y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual. Estos valores, más estrictos que los de la EPA, reflejan un enfoque precautorio hacia la salud pública en contextos donde la infraestructura de monitoreo es más robusta (European Parliament, 2008).

2.7.2. Normativa Latinoamericana Y Comparativa

En América Latina, varios países han adoptado estándares basados en la EPA o la OMS, pero con adaptaciones a sus contextos. En Chile, por ejemplo, el límite de 24 horas para PM_{10} es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, igual que el de la EPA, aunque se considera más estricto en $\text{PM}_{2.5}$ ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas). En México, la norma NOM-025-SSA1-2014 establece límites de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio de 24 horas y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (SEMARNAT, 2014). En Perú, la normativa de calidad ambiental (Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM) fija límites de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio anual (MINAM, 2017).

Estas diferencias muestran que, aunque todos los países reconocen la importancia de controlar el material particulado, los estándares adoptados varían según su capacidad institucional y las condiciones ambientales locales. En general, la tendencia en la región es avanzar hacia límites más estrictos, cercanos a los de la OMS, conforme se fortalecen las redes de monitoreo y las políticas de gestión de la calidad del aire (OPS, 2021).

2.7.3. Normativa Boliviana: Ley 1333 Y Reglamentos Específicos

En Bolivia, el marco legal ambiental está dado por la Ley N.º 1333 del Medio Ambiente, promulgada el 27 de abril de 1992. Esta norma establece que toda actividad que altere la calidad del aire deberá ser regulada y controlada por el Estado. El reglamento específico es el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA), aprobado mediante

Decreto Supremo en 1995, que fija los límites permisibles de contaminantes criterio, entre ellos el PM_{10} (Bolivia, 1992; Bolivia, 1995).

El valor límite nacional para PM_{10} en Bolivia es de $150 \mu g/m^3$ en promedio de 24 horas y $50 \mu g/m^3$ como promedio anual, lo que coincide con los estándares de la EPA. Sin embargo, estos valores son mucho menos estrictos que las recomendaciones actuales de la OMS. Informes del Sistema Nacional de Información Ambiental (SNIA) han señalado que en ciudades bolivianas como Cochabamba, La Paz, Santa Cruz y Tarija se han registrado con frecuencia superaciones de los $150 \mu g/m^3$, especialmente en época seca (SNIA, 2021).

En Tarija, las auditorías ambientales de la Contraloría (2020) y los estudios de Ugarte (2013) han demostrado que los valores de PM_{10} en zonas barriales superan tanto la normativa boliviana como los valores guía de la OMS. Esto pone en evidencia la necesidad de políticas de mitigación más estrictas y de estudios científicos que cuantifiquen la contribución de fuentes específicas, como las vías no pavimentadas, a los niveles de contaminación registrados.

2.8. Factores Que Influyen En Las Emisiones De Polvo

2.8.1. Tráfico Vehicular

El tráfico vehicular es uno de los principales factores que contribuyen a la generación de emisiones de polvo en carreteras no pavimentadas. Cada vehículo que transita por estas vías genera una perturbación mecánica del suelo, lo que provoca la suspensión de partículas en el aire, conocidas como polvo fugitivo. El volumen de tráfico, el tipo de vehículos y la velocidad a la que estos circulan son determinantes directos de la cantidad de polvo emitido. Los vehículos más pesados y aquellos que transitan a mayor velocidad generan mayores cantidades de polvo debido a la mayor energía cinética y la presión que ejercen sobre la superficie del camino. Según el modelo AP-42 de la EPA, el volumen de tráfico y la velocidad de los vehículos se encuentran entre las principales variables empíricas para la estimación de emisiones de polvo (EPA, 1995).

2.8.2. Características Del Suelo

Las propiedades físicas del suelo tienen un impacto significativo en la generación de polvo en carreteras no pavimentadas. Los suelos con altos porcentajes de partículas finas, como limos y arcillas, son más susceptibles a emitir polvo cuando son perturbados por el tráfico vehicular. Las partículas finas, menores a 75 micras, tienen un bajo peso y tienden a suspenderse fácilmente en el aire. El porcentaje de finos, junto con la cohesión y la estructura del suelo, influye en su capacidad para liberar polvo. Además, la humedad del suelo actúa como un factor atenuante, ya que en suelos húmedos las partículas se agrupan y se reducen las emisiones de polvo. La importancia del contenido de finos en la generación de polvo está contemplada en las ecuaciones empíricas del modelo AP-42 (Watson et al., 2000).

2.8.3. Condiciones Climáticas

El clima juega un papel esencial en la dinámica de emisión y dispersión del polvo en carreteras no pavimentadas. Factores como la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura del aire afectan tanto la cantidad de polvo que se genera como su comportamiento en la atmósfera. Un viento fuerte puede levantar partículas finas del suelo y transportarlas a largas distancias, mientras que la humedad del aire puede reducir la cantidad de polvo en suspensión al hacer que las partículas se adhieran entre sí. Asimismo, la precipitación temporalmente mitiga la generación de polvo al compactar el suelo y aumentar su contenido de humedad. Las condiciones climáticas también se reflejan en la estacionalidad de las emisiones de polvo, con mayores emisiones en épocas secas (Grini et al., 2002).

2.9. Métodos De Medición De Emisiones De Polvo

Los métodos de medición de emisiones de polvo son técnicas empleadas para cuantificar las concentraciones de partículas en suspensión (PM10, PM2.5) generadas por fuentes de polvo fugitivo, como carreteras no pavimentadas, sitios de construcción y actividades

industriales. Estas partículas, que permanecen en el aire tras ser liberadas por la acción del tráfico o el viento, representan un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Los métodos de medición se dividen en métodos directos, que implican la recolección física de las partículas, y métodos indirectos, que estiman las emisiones basándose en modelos teóricos y empíricos.

2.9.1. Métodos Directos De Medición De Emisiones De Polvo

Los métodos directos implican la recolección física de partículas en filtros o la medición en tiempo real mediante sensores. Estos métodos permiten obtener datos precisos y empíricos sobre las concentraciones de partículas en el aire, comúnmente expresadas en términos de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para partículas PM10 y PM2.5.

2.9.1.1. Muestreo Gravimétrico

El muestreo gravimétrico es el método estándar utilizado para la medición de partículas en suspensión en el aire. Este método emplea dispositivos como los muestreadores de alto volumen (High-Volume Air Samplers), que aspiran grandes volúmenes de aire a través de un filtro donde se retienen las partículas. El filtro es posteriormente pesado en laboratorio antes y después del muestreo para calcular la masa de las partículas recolectadas. Esta masa, junto con el volumen de aire filtrado, permite determinar la concentración de partículas en el aire.

El muestreo gravimétrico es ampliamente utilizado en estudios de monitoreo ambiental, especialmente en áreas cercanas a fuentes de polvo fugitivo, como carreteras no pavimentadas o sitios industriales. Proporciona datos precisos que son esenciales para cumplir con normativas de calidad del aire y para la validación de modelos de estimación de emisiones.

2.9.1.2. Monitoreo Portátil Con Minivol TAS

El MiniVol TAS (Tactical Air Sampler) es un equipo portátil ampliamente utilizado para la medición de concentraciones de material particulado (PM) en estudios de campo,

especialmente en áreas remotas o con infraestructura limitada. Diseñado para ser ligero y fácil de transportar, el MiniVol TAS es alimentado por baterías y permite recolectar muestras de polvo y otras partículas en suspensión, como PM10 (partículas con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$) y PM2.5 (partículas con diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu\text{m}$).

Este dispositivo es especialmente útil para la recolección de datos en estudios ambientales donde se requiere flexibilidad en la ubicación de los puntos de monitoreo, como en carreteras no pavimentadas, sitios de construcción, áreas rurales y entornos donde el acceso a energía eléctrica es limitado o inexistente.

Principio de funcionamiento

El MiniVol TAS funciona aspirando aire a través de un filtro mediante una bomba controlada por un sistema programable. Durante el período de muestreo, el equipo recoge partículas en el filtro a un caudal constante y predefinido. Al finalizar el período de recolección, los filtros con las partículas capturadas son retirados y enviados a un laboratorio para su análisis gravimétrico o químico.

Aspiración del aire: El MiniVol TAS aspira un volumen conocido de aire a través de un cabezal de muestreo, donde las partículas en suspensión son separadas y retenidas en un filtro.

Recolección en filtro: Las partículas recolectadas se depositan en un filtro que luego es pesado en el laboratorio antes y después del muestreo para determinar la masa de polvo recolectado.

Análisis posterior en laboratorio: Una vez finalizado el muestreo, los filtros son transportados a un laboratorio para ser analizados. En el laboratorio, se realiza un análisis gravimétrico que permite determinar la concentración de partículas en el aire en términos de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). También pueden realizarse análisis químicos si se desea caracterizar la composición del polvo.

Figura 2.1. Equipo MiniVol TAS



Fuente: Siafa, 2019.

- 1- Temporizadores programable y flujómetro
- 2- Pila
- 3- Cabezal
- 4- Contador de tiempo de muestreo. En la parte posterior del equipo (dentro de la caja) se encuentra la bomba.

Características técnicas del MiniVol TAS

- Portabilidad: El equipo es pequeño, ligero (pesa alrededor de 4.5 kg) y puede ser transportado fácilmente a ubicaciones remotas. Su diseño portátil y alimentado por baterías permite operarlo sin necesidad de electricidad externa, haciéndolo ideal para estudios en áreas de difícil acceso.
- Caudal de aire controlado: El MiniVol TAS opera a un flujo de aire constante de aproximadamente 5 litros por minuto (L/min), lo que es significativamente menor que los muestreadores de alto volumen, pero suficiente para recolectar muestras representativas de partículas en suspensión.

- **Cabezal de muestreo intercambiable:** El equipo permite cambiar el cabezal de muestreo para capturar diferentes fracciones de material particulado, como PM10 y PM2.5. Esto lo hace versátil y útil para distintos tipos de estudios.
- **Duración de operación:** La batería del MiniVol TAS permite realizar muestreos durante 24 horas continuas, lo que es suficiente para la mayoría de los estudios que requieren recolección de muestras a lo largo de un día o en condiciones específicas de tráfico o clima.
- **Programabilidad:** El MiniVol TAS puede programarse para operar en intervalos de tiempo específicos, lo que permite adaptarlo a las necesidades del estudio y optimizar el proceso de recolección de muestras.

Aplicaciones del MiniVol TAS

- **Monitoreo de polvo en carreteras no pavimentadas**

El MiniVol TAS es ideal para estudios en carreteras no pavimentadas, donde las emisiones de polvo fugitivo representan un problema significativo debido al tráfico vehicular. Este equipo permite medir las concentraciones de partículas en suspensión en múltiples puntos de la carretera, facilitando el análisis de cómo varían las emisiones de polvo en función del volumen de tráfico, el tipo de vehículos y las condiciones meteorológicas.

- **Monitoreo en diferentes puntos:** El MiniVol TAS puede ser instalado en diferentes tramos de la carretera para comparar las concentraciones de polvo en función del tráfico y otras variables.
- **Estudios de validación de modelos:** Los datos obtenidos con el MiniVol TAS son útiles para validar modelos de estimación de emisiones de polvo, como el modelo AP-42, que se utiliza para prever las emisiones en carreteras no pavimentadas.

- **Estudios en áreas rurales y sitios remotos**

Dado que el MiniVol TAS es alimentado por baterías, es adecuado para su uso en áreas rurales o remotas donde no hay acceso a la red eléctrica. Su portabilidad lo convierte en

una herramienta ideal para estudios en zonas agrícolas, áreas de minería o sitios de construcción.

- Recolección de datos temporales: Al ser portátil, el MiniVol TAS puede ser trasladado a diferentes ubicaciones para medir las concentraciones de partículas en varios puntos. Esto permite obtener un perfil espacial de las emisiones de polvo en un área de estudio.
- Evaluación de medidas de control de polvo: El MiniVol TAS también puede ser utilizado para evaluar la efectividad de medidas de mitigación de emisiones de polvo, como el riego de caminos o el uso de estabilizadores químicos.

Figura 2.2. Muestreador MiniVol TAS.



Fuente: Elaboración Propia

2.9.1.3. Monitoreo Continuo Con Sensores Automáticos

Los sensores automáticos permiten medir las concentraciones de partículas en suspensión de manera continua y en tiempo real. Estos dispositivos utilizan tecnologías como la

fotometría láser o la oscilación de micro balanza para detectar y cuantificar las partículas en el aire. Generalmente, los sensores automáticos están instalados en estaciones fijas de monitoreo de calidad del aire, que operan de manera continua para registrar las fluctuaciones en las concentraciones de polvo a lo largo del tiempo.

El monitoreo continuo es ideal para estudios de largo plazo donde se requiere una vigilancia constante de la calidad del aire, como en áreas urbanas o cercanas a carreteras no pavimentadas con alto tráfico vehicular. Los datos en tiempo real son útiles para cumplir con las normativas ambientales y para evaluar el impacto de medidas de mitigación de emisiones de polvo, como el riego de carreteras o la estabilización del suelo.

2.9.2. Métodos Indirectos De Medición De Emisiones De Polvo.

Los métodos indirectos de medición de emisiones de polvo son técnicas que permiten estimar la cantidad de partículas en suspensión (PM10, PM2.5) sin necesidad de recolectarlas físicamente. En lugar de utilizar equipos de muestreo directo, estos métodos se basan en modelos matemáticos y empíricos que emplean datos de diversas variables para predecir las emisiones de polvo. Los métodos indirectos son muy útiles en situaciones donde el monitoreo directo no es factible, como cuando se requiere estimar las emisiones a gran escala, durante largos períodos o en áreas de difícil acceso.

Estos métodos estiman las emisiones en función de factores como:

- Volumen de tráfico vehicular.
- Tipo y peso de los vehículos.
- Velocidad de los vehículos.
- Características del suelo, especialmente el contenido de partículas finas.
- Condiciones meteorológicas, como velocidad del viento y humedad del aire.

Los modelos utilizados en los métodos indirectos de medición se dividen en modelos empíricos (basados en datos experimentales recolectados previamente) y modelos teóricos (basados en ecuaciones físicas y matemáticas que simulan la dispersión de polvo).

2.10. Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo

Los modelos de estimación de emisiones de polvo son herramientas analíticas diseñadas para predecir la cantidad de partículas en suspensión que se generan a partir de fuentes como carreteras no pavimentadas, construcciones o actividades industriales. Estos modelos son fundamentales para cuantificar y gestionar los impactos ambientales y de salud pública relacionados con el polvo fugitivo. Las partículas en suspensión, particularmente las fracciones PM10 y PM2.5, tienen un impacto significativo en la calidad del aire y pueden generar problemas respiratorios y cardiovasculares en la población expuesta.

Los modelos de estimación de emisiones de polvo utilizan ecuaciones matemáticas que relacionan las emisiones con variables clave, como el tráfico vehicular, el tipo de suelo, las condiciones climáticas y las características del terreno. Al predecir la cantidad de partículas generadas por actividades específicas, estos modelos permiten a los ingenieros y planificadores identificar las fuentes de emisión más críticas y desarrollar estrategias de control adecuadas. (Holmes, NS y Morawska, L. 2006).

2.10.1. Clasificación De Los Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo

Existen varios enfoques para estimar las emisiones de polvo en carreteras no pavimentadas. Estos pueden clasificarse en dos grandes categorías:

Modelos empíricos: Estos modelos se basan en observaciones y datos recolectados en estudios previos. Las ecuaciones se derivan ajustando los datos mediante análisis estadísticos. Los modelos empíricos dependen fuertemente de la calidad y la representatividad de los datos utilizados para su calibración.

Modelos físicos o mecanísticos: Estos modelos intentan describir el proceso de generación y dispersión de polvo basándose en principios físicos, como la mecánica del suelo y la aerodinámica. Aunque pueden ser más precisos, tienden a ser más complejos y requieren datos específicos y detallados que pueden ser difíciles de obtener en la práctica.

2.11. Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo En Vías No Pavimentadas

2.11.1. Evolución De Los Modelos De Emisión

Los primeros intentos de estimar las emisiones de polvo de vías no pavimentadas surgieron en Estados Unidos en la década de 1970, en el marco de la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act). En ese entonces, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) recopiló datos empíricos de carreteras rurales y mineras para construir factores de emisión representativos. Estos factores permitieron cuantificar, de manera simplificada, las emisiones de material particulado (PM) por unidad de tránsito vehicular (EPA, 1995).

A lo largo de los años, diferentes países han generado modelos propios para cuantificar emisiones atmosféricas de tránsito. En Europa, por ejemplo, se utilizan modelos como **COPERT** (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport), desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, que estima emisiones de contaminantes incluyendo partículas de desgaste de frenos y llantas, pero no contempla directamente la Re suspensión de polvo de vías no pavimentadas (Ntziachristos & Samaras, 2018).

En Australia se han adaptado metodologías similares a las de la EPA para contextos desérticos y semiáridos, considerando factores de meteorología local (CSIRO, 2014).

2.11.2. El Modelo AP-42 De La EPA

El AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors, publicado por la EPA, es el compendio más utilizado a nivel mundial para estimar emisiones atmosféricas de diferentes fuentes. Su sección 13.2.2 se centra en caminos no pavimentados y presenta una ecuación empírica derivada de múltiples campañas de medición en campo (EPA, 2000).

La ecuación general para PM₁₀ es:

Ecuación AP-42

$$E = k \times \left(\frac{s}{12}\right)^a \times \left(\frac{W}{3}\right)^b \times \left(\frac{V}{30}\right)^c$$

Fuente: Agencia Protección Ambiental (EPA)

Donde:

- E = emisión en gramos por vehículo-kilómetro (g/VKT).
- s = porcentaje de material fino en la superficie (< 0,075 mm).
- W = peso promedio de vehículos (t).
- V = velocidad promedio (km/h).
- k, a, b, c = parámetros empíricos definidos según fracción de partículas.

Para PM₁₀, la EPA propone: k=1,8, a=0,8, b=0,5, c=0,5. La ecuación también puede incorporar factores de corrección por humedad o por número de ruedas (EPA, 1995).

Este modelo ha sido validado en múltiples contextos semiáridos, mostrando correlaciones aceptables entre las emisiones estimadas y las concentraciones medidas en campo (EPA, 2000).

2.11.3. Variables Principales Del AP-42

- **Contenido de finos (s):** determina el potencial de Re suspensión de polvo. Un incremento del 5 % en s puede duplicar las emisiones en ciertos suelos (EPA, 2000).
- **Peso promedio vehicular (W):** refleja el impacto del tránsito. Cuanto mayor el tonelaje promedio, más fuerte es la compactación y Re suspensión de partículas.

- **Velocidad (V):** incrementa la turbulencia aerodinámica. La relación es proporcional a la raíz cuadrada de V, por lo que duplicar la velocidad de 15 a 30 km/h puede aumentar las emisiones en ~40 %.

Estos parámetros son relativamente simples de medir en campo, lo que hace al AP-42 un modelo práctico para proyectos de investigación y planes de gestión ambiental (EPA, 2000; Kacer et al., 2024).

2.11.4. Ventajas Del Modelo AP-42

El AP-42 presenta varias ventajas frente a otros modelos:

1. **Simplicidad:** requiere pocas variables de entrada (s, W, V), fáciles de medir en campo.
2. **Flexibilidad:** puede aplicarse en distintos contextos climáticos, siempre que se midan localmente las variables.
3. **Aceptación internacional:** es citado en manuales de gestión ambiental en EE.UU., Chile, Perú, México y Brasil.
4. **Aplicabilidad en zonas semiáridas:** donde predominan vías no pavimentadas, como en Tarija, el modelo se ajusta adecuadamente.

En estudios latinoamericanos, se ha demostrado que la aplicación de AP-42 permite obtener estimaciones cercanas a las mediciones directas, siempre que se valide con un factor local de corrección (k). En Chile, por ejemplo, las correlaciones alcanzaron valores de R^2 entre 0,7 y 0,9 (Molina et al., 2015).

2.11.5. Limitaciones Del AP-42 Y Necesidad De Validación Local

Pese a su utilidad, el modelo AP-42 presenta limitaciones importantes:

- Fue desarrollado principalmente con datos de carreteras rurales de EE.UU., que pueden diferir de las condiciones de suelo y tráfico en Bolivia.

- Los parámetros k , a , b , c son empíricos y no necesariamente representan todas las condiciones locales.
- El modelo no considera explícitamente factores como pendiente, viento, tipo de llantas o intensidad del tráfico pesado.
- Puede sobreestimar o subestimar emisiones si el valor de humedad no se mide adecuadamente (EPA, 2000).

Por estas razones, la literatura recomienda validar el modelo con mediciones directas en campo, ajustando un factor local de proporcionalidad (k local) que mejore la precisión en cada contexto específico (Kacer et al., 2024).

En Bolivia, al no existir estudios previos en Tarija con esta metodología, la presente investigación se convierte en un aporte original para establecer parámetros locales y validar el uso del AP-42 en vías barriales.

2.12. Métodos De Medición Y Validación

2.12.1. Técnicas De Muestreo Directo De Partículas

Existen diferentes técnicas para medir concentraciones de material particulado en aire. Los métodos gravimétricos son los más utilizados en investigaciones académicas y en redes de monitoreo de referencia. Consisten en pasar un volumen conocido de aire a través de un filtro, donde se retienen las partículas. Posteriormente, el filtro es pesado en condiciones controladas para determinar la masa de partículas acumuladas, la cual se divide por el volumen de aire muestreado para obtener la concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (WHO, 2021).

Dentro de los métodos gravimétricos destacan los muestreadores de alto volumen (Hi-Vol), que operan a caudales superiores a $1 \text{ m}^3/\text{min}$, recolectando partículas en filtros grandes, generalmente de fibra de cuarzo o de vidrio. Su principal ventaja es la gran cantidad de muestra obtenida, lo que permite análisis químicos posteriores. Sin embargo,

son equipos costosos, voluminosos y requieren infraestructura eléctrica y protección, lo que limita su uso en campañas barriales (EPA, 2000).

Los muestreadores de bajo volumen como el MiniVol TAS son una alternativa portátil y más económica. Operan a caudales de 5 L/min, con capacidad de muestreo de 4 a 24 horas. Aunque presentan menor sensibilidad en concentraciones muy bajas, han demostrado buen acuerdo con los Hi-Vol en ambientes con niveles medios y altos de material particulado (AirMetrics, 2010).

2.12.2. Métodos En Tiempo Real

Además de los gravimétricos, existen métodos instrumentales en tiempo real, como los monitores TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) y los fotómetros de dispersión de luz tipo DustTrak. Estos equipos entregan lecturas instantáneas de concentración, permitiendo observar la variabilidad horaria o incluso minuto a minuto. Su ventaja principal es la alta resolución temporal, aunque requieren calibraciones frecuentes y suelen tener costos elevados (Chow et al., 2015).

En campañas de bajo presupuesto, como las que se realizan en barrios urbanos de países en desarrollo, el uso de MiniVol es más factible, ya que combina portabilidad, bajo costo relativo y fiabilidad aceptable (AirMetrics, 2010).

2.12.3. Estrategias De Validación De Modelos

La validación de modelos de estimación, como el AP-42, requiere comparar las emisiones estimadas (E , g/VKT) con las concentraciones medidas en campo (C , $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Esta comparación no es directa, pues una es una tasa de emisión y la otra una concentración ambiental. Por ello, se utiliza un modelo proporcional del tipo:

Ecuación AP-42

$$C = k \times E$$

Fuente: Elaboración propia

donde k es un factor local de conversión, que integra aspectos de dispersión, meteorología y características de la vía. El ajuste de k se realiza mediante regresión lineal entre valores medidos y estimados en una submuestra de tramos, lo que permite luego aplicar el modelo al resto de la red (Molina et al., 2015).

En estudios latinoamericanos, el valor de k varía según el contexto: en Chile, se reportaron valores de R^2 entre 0,7 y 0,9 en la validación; en Perú, los valores oscilaron entre 0,6 y 0,8 (Molina et al., 2015; Vásquez et al., 2019). Esto confirma que la validación empírica es indispensable para asegurar la aplicabilidad del AP-42 en un nuevo contexto, como el de Tarija.

2.13. Antecedentes Internacionales Y Nacionales

2.13.1. Antecedentes Internacionales

En Chile, estudios en la Región de Atacama evaluaron la contribución de vías no pavimentadas al material particulado urbano. Se concluyó que estas vías son responsables de hasta el 30 % de las concentraciones de PM_{10} en localidades mineras y semiáridas, validando el uso del AP-42 con buenos ajustes frente a mediciones locales (Molina et al., 2015).

En Perú, investigaciones en Arequipa aplicaron el modelo AP-42 en barrios con calles de tierra. Los resultados mostraron que la combinación de tránsito moderado y alto contenido de finos elevaba las concentraciones de PM_{10} muy por encima del límite nacional de $100 \mu g/m^3$, confirmando la necesidad de pavimentación o riego periódico (Vásquez et al., 2019).

En México, la Secretaría de Medio Ambiente ha reconocido que las vialidades sin pavimento son una fuente significativa de polvo urbano. Estudios en Chihuahua y Ciudad de México han encontrado que las emisiones de este tipo de vías pueden representar entre el 20 % y 40 % de las concentraciones totales de PM_{10} en la atmósfera (Salini Calderón, 2017).

En Brasil, investigaciones en Minas Gerais demostraron que, en ciudades medianas, el

polvo de caminos no pavimentados es la principal fuente de superaciones de la norma de PM_{10} en temporada seca, especialmente en zonas de tránsito de camiones cañeros (Pereira et al., 2017).

2.13.2. Antecedentes Nacionales En Bolivia

En Bolivia, la información sobre contaminación del aire se concentra principalmente en las ciudades del eje central (La Paz, Cochabamba, Santa Cruz). El Programa Nacional de Gestión de Calidad del Aire (SNIA, 2021) ha identificado al material particulado (PM_{10}) como el contaminante criterio que más frecuentemente supera los límites normativos.

En Cochabamba, estudios de MoniCA han reportado valores de PM_{10} superiores a $200 \mu g/m^3$ en episodios de inversión térmica, con importante influencia de polvo urbano y de vías sin pavimentar (SNIA, 2021).

En La Paz, se han identificado niveles de PM_{10} de hasta $180 \mu g/m^3$ en temporada seca, con contribución tanto de fuentes móviles como de polvo de calles (OPS, 2019).

En Santa Cruz, la rápida expansión urbana y el uso de calles de tierra en barrios periféricos generan concentraciones elevadas de polvo en suspensión, lo que ha sido confirmado en auditorías ambientales de la Contraloría (2020).

En Tarija, Ugarte (2013) reportó mediciones de PM_{10} en la Red MoniCA, mostrando valores de hasta $180\text{--}200 \mu g/m^3$ en la época seca, superando la normativa nacional y la guía de la OMS. Estudios con bioindicadores (Acta Nova, 2018) confirmaron también que ciertos sectores de la ciudad presentan acumulación significativa de material particulado. No obstante, hasta la fecha, no existe un estudio que cuantifique las emisiones específicas de vías no pavimentadas con base en aforos vehiculares y caracterización de suelos, lo cual marca el vacío que la presente investigación busca llenar.

2.14. Ensayos De Caracterización De Suelos

2.14.1. Importancia De La Caracterización De Suelos En Vías No Pavimentadas

La caracterización de suelos constituye un paso esencial en los estudios de ingeniería civil y ambiental, pues permite determinar las propiedades físicas y mecánicas que condicionan el comportamiento de un terreno bajo cargas y condiciones climáticas específicas. En el caso de las vías no pavimentadas, la caracterización es doblemente importante: primero, porque influye directamente en la transitabilidad y durabilidad de la vía, y segundo, porque sus propiedades físicas determinan la magnitud de polvo que puede ser liberado al ambiente cuando los vehículos circulan sobre ella (Braja Das, 2010).

Uno de los parámetros más críticos para el modelo de emisiones AP-42 es el contenido de finos (s), es decir, la proporción de partículas menores de 0,075 mm presentes en el suelo superficial de la vía. Estos finos son los que, al ser levantados por la acción mecánica de los neumáticos y la turbulencia del aire, forman parte de la fracción respirable PM₁₀. Por lo tanto, sin una correcta caracterización del suelo, el cálculo de emisiones carecería de validez científica (EPA, 1995).

En el contexto de Tarija, los suelos de la provincia Cercado presentan características variadas, desde terrenos arcillosos en zonas bajas hasta suelos más arenosos en laderas y quebradas. Esto hace imprescindible la aplicación de ensayos de laboratorio para cuantificar el porcentaje de finos, la humedad y otras propiedades relevantes que servirán de insumo al modelo (Ugarte, 2013).

2.14.2. Granulometría (AASHTO T88)

El análisis granulométrico por tamizado es uno de los ensayos más antiguos y fundamentales en mecánica de suelos. Consiste en separar las partículas de una muestra de suelo mediante una serie de tamices normalizados con aberturas decrecientes, de forma que se pueda determinar la proporción de partículas que se retienen en cada tamiz y las que pasan al siguiente (Head, 2006).

El resultado se presenta en una curva granulométrica en papel semilogarítmico, que permite clasificar el suelo como bien graduado, mal graduado o uniforme, según los coeficientes de uniformidad y curvatura (ASTM D422, 2007).

Tabla 2.1. Clasificación de suelos según cada tamaño de partículas

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		2 - 60 mm
Arenas		0,06 - 2 mm
Material fino	Limo	0,002 - 0,06 mm
	Arcilla	menor a 0,002 mm

Fuente: Braja M. Das (2012)

Para efectos del modelo AP-42, el dato más relevante es el porcentaje que pasa por el tamiz N.º 200 (0,075 mm), ya que este valor corresponde al contenido de finos (s).

2.14.3. Contenido De Humedad (AASHTO T265)

El contenido de humedad es uno de los parámetros más relevantes en el comportamiento de los suelos y en la generación de polvo en vías no pavimentadas. Se define como la relación entre el peso del agua contenida en una muestra y el peso de los sólidos secos, expresado en porcentaje (Head, 2006).

Ecuación contenida de humedad %

$$w = \frac{(w_h - w_s)}{w_s} \times 100$$

donde W_h es el peso húmedo y W_s el peso seco.

En el contexto de vías no pavimentadas, este parámetro tiene un rol crucial: cuanto mayor es la humedad superficial, mayor es la cohesión entre partículas y menor la Re suspensión de polvo. Por ello, la humedad se utiliza en algunos estudios como factor de corrección en la ecuación AP-42 (EPA, 2000). En condiciones de Tarija, la humedad natural suele

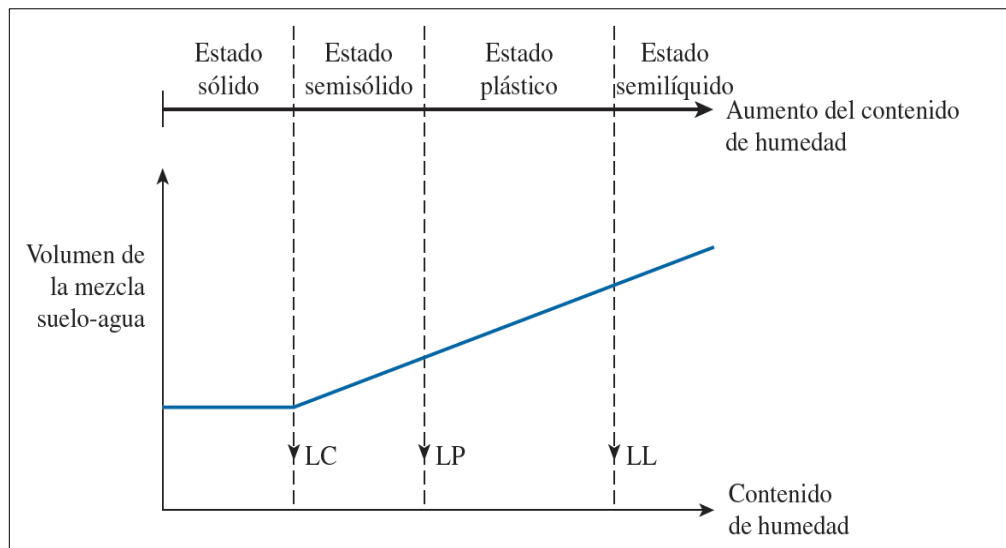
ser muy baja en la temporada seca, lo que incrementa el riesgo de emisiones elevadas de PM_{10} (Ugarte, 2013).

2.14.4. Límites De Atterberg

En mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciables y sin desmoronarse ni agrietarse. (Juárez & Rico, 2005).

El autor Crespo Villalaz (2017) indica que, “La plasticidad es la propiedad que presenta los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separo los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes. Límite líquido (L.L), límite plástico (L.P) y límite de contracción (L.C)”.

Figura 2.3. Límites de consistencia de suelos de grano fino



Fuente: Braja M. Das (2012)

2.14.4.1. Límite Líquido (AASHTO T89)

Se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 2017).

El límite líquido es el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico.

Se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba ASTM D-4318) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes. (Braja M. Das, 2012).

2.14.4.2. Límite Plástico (AASHTO T90)

Se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido, así también como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro.

La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (designación de prueba ASTM D-4318). (Braja M. Das, 2012).

2.14.4.3. Índice De Plasticidad

Se denomina Índice de Plasticidad a la diferencia numérica entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP), e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos. (Crespo Villalaz, 2004).

Tabla 2.2. Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$IP \leq 20$ $IP > 7$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástica (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Ministerio de transportes y comunicaciones (2014)

2.14.5. Clasificación De Suelos

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. (Braja M. Das, 2016).

2.14.5.1. Sistema Unificado De Clasificación De Suelos SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System) fue propuesto originalmente por Casagrande en 1942 y más tarde lo revisó y adoptó el United

States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers. En la actualidad el sistema se utiliza prácticamente en todo el trabajo geotécnico. (Braja M. Das, 2012).

Tabla 2.3. Símbolos utilizados en la clasificación SUCS

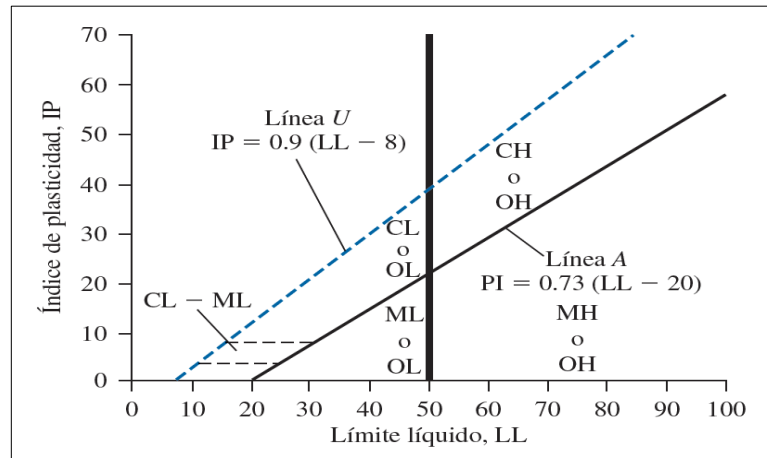
Descripción	Símbolo
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Limos orgánicos y arcilla	O
Turba y suelos altamente orgánicos	Pt
Bien graduado	W
Mal graduado	P
Alta plasticidad (límite líquido mayor a 50)	H
Baja plasticidad (límite líquido menor a 50)	L

Fuente: Braja M. Das (2012)

Igualmente, Casagrande propuso la carta de plasticidad la cual relaciona en una gráfica el límite líquido frente al índice de plasticidad. Dentro de la gráfica, además de la línea que separa los suelos de alta plasticidad de los de baja plasticidad, definió las líneas A y U.

La primera línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos mediante la expresión $PI = 0,73 (LL - 20)$ y la línea U es el límite superior de la relación del índice de plasticidad con el límite líquido. Se define como $PI = 0,9 (LL - 8)$.

Figura 2.4. Carta de plasticidad



Fuente: Braja M. Das (2012)

2.15. Aforo Vehicular

2.15.1. Concepto E Importancia

El aforo vehicular es el conteo sistemático de vehículos que circulan por una vía en un período de tiempo determinado. Su finalidad es obtener información sobre el Volumen Promedio Diario (VPD), la composición vehicular y los patrones de circulación. En ingeniería de tránsito, los aforos son esenciales para el diseño geométrico de carreteras, la planificación de pavimentación y la estimación de emisiones contaminantes (ABC, 2018).

En el presente estudio, el aforo cumple una función clave porque dos de las variables principales del modelo AP-42 peso promedio vehicular (W) y velocidad promedio (V) dependen directamente de la caracterización del tránsito. Así, sin un aforo confiable, las emisiones calculadas no reflejarían la realidad local.

Existen distintos tipos de aforos:

- **Manual:** realizado por encuestadores con planillas normalizadas, recomendado para conteos de corta duración.
- **Automático:** mediante tubos neumáticos, espiras magnéticas o cámaras.

- **Corto plazo:** típicamente de 12 horas, que requieren factores de expansión para estimar el flujo diario.
- **Permanentes:** estaciones fijas que registran 24/7, utilizadas en carreteras principales.

En Tarija, por limitaciones de recursos, lo más factible es realizar aforos manuales de corto plazo en barrios seleccionados, siguiendo los formatos de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), ajustando los resultados mediante factores de expansión (ABC, 2018).

2.15.2. Clasificación Vehicular Y Estimación Del Peso Promedio (W)

El peso promedio de los vehículos (W) es otra variable esencial del modelo AP-42, ya que el tránsito pesado genera mayores vibraciones y compactación sobre la superficie, lo que incrementa la Re suspensión de partículas finas (EPA, 2000).

Para obtener este valor, se realiza una clasificación vehicular durante el aforo, dividiendo los vehículos en categorías:

- **Livianos:** automóviles, motocicletas, camionetas.
- **Medianos:** minibuses, con carga ligera.
- **Pesados:** camiones de 2 a 3 ejes, buses grandes.

2.15.3. Medición De Velocidad Vehicular Con Radar Y Percentil 85

La velocidad de circulación (V) es otro factor determinante en la generación de polvo, pues incrementa la turbulencia del aire alrededor de los vehículos, lo que eleva la Re suspensión de partículas. El modelo AP-42 utiliza la velocidad promedio en kilómetros por hora como una de sus variables de entrada (EPA, 1995).

Para obtener este valor, se recomienda el uso de radares de tráfico portátiles, que permiten registrar la velocidad instantánea de cada vehículo con alta precisión. Alternativamente,

puede usarse el método de cronometraje, midiendo el tiempo que tarda un vehículo en recorrer un tramo de longitud conocida.

En estudios de tránsito se utiliza como valor de referencia la velocidad del percentil 85 (V_{85}), definida como la velocidad que no supera el 85 % de los vehículos observados. Esta métrica refleja mejor las condiciones reales de circulación, ya que descarta valores extremos muy bajos o muy altos. Además, es la utilizada en la mayoría de manuales de diseño y control de tránsito, como el Highway Capacity Manual (HCM, 2016).

De esta forma, el radar no solo entrega la velocidad instantánea, sino que permite calcular el percentil 85 a partir de una muestra de velocidades medidas en el tramo de estudio.

2.16. Formas De Mitigación De Emisiones En Vías No Pavimentadas

2.16.1. Importancia De La Mitigación Del Polvo En Áreas Urbanas

La contaminación por material particulado en áreas urbanas no solo constituye un problema ambiental, sino también un desafío de salud pública. En barrios con calles de tierra, las concentraciones de PM_{10} suelen superar con frecuencia los límites establecidos por la normativa nacional e internacional. En Tarija, los valores de PM_{10} registrados en época seca han alcanzado hasta 180–200 $\mu g/m^3$, sobrepasando los 150 $\mu g/m^3$ permitidos por la Ley 1333 y cuadruplicando los valores guía de la OMS (Ugarte, 2013; SNIA, 2021).

En este contexto, la aplicación de estrategias de mitigación es esencial para reducir la exposición de la población y mejorar la calidad de vida, especialmente en sectores vulnerables. La literatura internacional identifica cuatro grandes grupos de medidas: riego con agua, aplicación de supresores químicos, mejoras geométricas y estructurales, y pavimentación definitiva. Cada una tiene ventajas, limitaciones y costos que deben analizarse en función del contexto local (EPA, 2000).

2.16.2. Riego Periódico Con Agua

El riego con agua es la medida de control más utilizada en Bolivia y otros países de América Latina. Consiste en aplicar agua con cisternas municipales para humedecer la

superficie de la vía, aumentando temporalmente la cohesión entre partículas finas y reduciendo su re suspensión por el tránsito vehicular (EPA, 2000).

Estudios en Chile han mostrado que el riego puede disminuir las concentraciones de PM_{10} en un 40–60 % inmediatamente después de su aplicación (Molina et al., 2015). Sin embargo, su efecto dura solo entre 2 y 6 horas, dependiendo de la temperatura ambiental, la intensidad del tráfico y la radiación solar.

En climas semiáridos como el de Tarija, donde la disponibilidad de agua puede ser limitada, esta medida presenta restricciones importantes. Además, los costos de operación de cisternas y la necesidad de repetir el riego varias veces al día hacen que sea una solución temporal y costosa.

2.16.3. Supresores Químicos De Polvo

Una alternativa más duradera que el riego es el uso de supresores químicos, entre los cuales destacan:

- **Cloruros (cloruro de calcio, cloruro de magnesio):** higroscópicos, absorben humedad del ambiente y mantienen cohesionadas las partículas.
- **Lignosulfonatos:** derivados de la industria papelera, funcionan como aglutinantes.
- **Polímeros sintéticos:** crean una capa delgada sobre la superficie del suelo, estabilizando la vía.

En Perú y Chile se han documentado reducciones del 50–70 % en emisiones de PM_{10} durante varias semanas después de la aplicación de estos productos (Vásquez et al., 2019). No obstante, presentan desventajas:

- Costo elevado, que puede ser insostenible para municipios pequeños.
- Posibles efectos ambientales secundarios, como salinización del suelo y contaminación del agua.

- Necesidad de Re aplicación periódica, aunque menos frecuente que el riego.

En Bolivia, su uso aún es limitado, pero representan una opción viable para vías críticas en barrios donde el tránsito es intenso y el impacto del polvo sobre la salud es alto.

2.16.4. Mejoras Geométricas Y De Mantenimiento

El diseño y mantenimiento de la vía influyen directamente en la generación de polvo. Medidas como el perfilado regular, la compactación adecuada y la construcción de drenajes laterales reducen la degradación superficial del suelo y, con ello, la liberación de partículas (ABC, 2018).

Además, el aporte de material granular de mejor calidad, con menor porcentaje de finos, puede disminuir significativamente las emisiones. En estudios brasileños, la estabilización de vías con mezclas granulares seleccionadas redujo en un 30 % las concentraciones de PM₁₀ en comparación con vías con suelos nativos (Pereira et al., 2017).

Estas medidas tienen la ventaja de ser relativamente económicas y sostenibles, aunque requieren equipos y personal para su mantenimiento periódico.

2.16.5. Pavimentación Como Solución Definitiva

La pavimentación de las vías es la medida más efectiva y definitiva para eliminar las emisiones de polvo. Estudios en Chile y Perú reportan reducciones de más del 90 % en PM₁₀ después de la pavimentación de calles urbanas (Molina et al., 2015; Vásquez et al., 2019).

Sin embargo, el costo inicial de estas obras es elevado, lo que hace inviable pavimentar todas las calles de manera inmediata. Por esta razón, los municipios deben establecer criterios de priorización, que consideren:

- Tráfico vehicular (VPD).
- Población expuesta.
- Niveles de emisiones estimadas.

- Proximidad a centros de salud, escuelas y áreas sensibles.

En este sentido, la presente investigación aporta al proceso de planificación, ya que permitirá identificar qué barrios generan mayores emisiones de polvo y, por lo tanto, deberían ser priorizados en programas de pavimentación.

2.16.6. Medidas Complementarias

Existen también medidas complementarias que, aunque no eliminan el problema de raíz, contribuyen a reducir la magnitud de las emisiones o a limitar la exposición de la población:

- Control de velocidad: limitar la velocidad de circulación a 30 km/h puede reducir las emisiones en un 30–40 % (EPA, 2000). Esto puede lograrse mediante señalización o reductores de velocidad.
- Restricción de tránsito pesado: desviar camiones y vehículos de gran tonelaje hacia rutas alternativas.
- Barreras verdes: la plantación de árboles y setos a lo largo de las vías ayuda a atrapar partículas en suspensión, además de generar beneficios estéticos y climáticos.
- Campañas comunitarias de limpieza: la remoción de material acumulado en bordes de vía reduce la fuente de polvo disponible para Re suspensión.

Estas acciones, combinadas con medidas estructurales, pueden contribuir a una mejora significativa de la calidad del aire en barrios con calles de tierra.

2.17. Fundamentos Estadísticos Aplicados A La Validación Del Modelo

2.17.1. Conceptos Básicos De Estadística Descriptiva

La estadística es una herramienta fundamental en la investigación científica, ya que permite organizar, resumir e interpretar los datos obtenidos en campo o laboratorio. En estudios ambientales y de ingeniería, la estadística descriptiva es la primera etapa del

análisis, que incluye medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y de dispersión (varianza, desviación estándar, coeficiente de variación) (Montgomery & Runger, 2018).

En el contexto de la presente investigación, la estadística descriptiva permitirá describir los resultados de los ensayos de suelo (porcentaje de finos, contenido de humedad), los aforos vehiculares (VPD, velocidad, peso promedio) y las mediciones de PM₁₀. Estos indicadores iniciales facilitan la comprensión de la magnitud y variabilidad de los datos recolectados.

2.17.2. Regresión Lineal Simple

La regresión lineal simple es una técnica estadística que establece una relación matemática entre una variable dependiente (Y) y una variable independiente (X), bajo el supuesto de linealidad. La ecuación general es:

$$Y = a + bX + \varepsilon$$

donde:

- Y: variable dependiente (ej. concentración de PM₁₀ medida con el MiniVol).
- X: variable independiente (ej. concentración de PM₁₀ estimada con AP-42).
- a: intercepto.
- b: pendiente de la recta.
- ε : error aleatorio.

En este estudio, la regresión lineal simple permitirá evaluar qué tan bien las concentraciones estimadas por el modelo AP-42 se ajustan a los valores medidos en campo. Un ajuste adecuado validará la aplicabilidad del modelo en las condiciones locales de Tarija.

2.17.3. Coeficiente De Determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) es un indicador estadístico que mide el grado de correlación entre los valores observados y los valores estimados por un modelo. Su valor varía entre 0 y 1, donde:

- $R^2 = 1$ indica un ajuste perfecto (toda la variabilidad observada se explica por el modelo).
- $R^2 = 0$ indica ausencia de correlación.

En validaciones de modelos ambientales, un valor de $R^2 > 0,7$ suele considerarse aceptable, aunque la interpretación depende del contexto y de la variabilidad de los datos (Chow et al., 2015).

En este trabajo, el coeficiente de determinación permitirá cuantificar la relación entre las emisiones estimadas con AP-42 y las concentraciones de PM_{10} medidas con el MiniVol TAS.

2.17.4. Error Cuadrático Medio (RMSE)

El Root Mean Square Error (RMSE) o Error cuadrático medio mide la magnitud promedio de los errores de predicción de un modelo. Su fórmula es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$

Donde Y_i son los valores observados, $\hat{Y}_i$ los valores estimados y n el número de observaciones.

El RMSE expresa la diferencia absoluta promedio entre los valores medidos y los calculados por el modelo, en las mismas unidades de la variable analizada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ en este caso). Un RMSE bajo indica un modelo más preciso (Willmott & Matsuura, 2005).

2.17.5. Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)

El Mean Absolute Percentage Error (MAPE) es un indicador relativo que mide el error en términos porcentuales:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|$$

El MAPE se utiliza ampliamente porque expresa el error de un modelo como porcentaje, lo que facilita la interpretación y comparación entre diferentes estudios. En modelos de contaminación atmosférica, valores de MAPE inferiores al 20 % se consideran aceptables para validaciones preliminares (Hyndman & Koehler, 2006).

2.18. Aplicaciones En Modelos De Calidad Del Aire

En estudios de calidad del aire, la combinación de indicadores estadísticos como **R²**, **RMSE** y **MAPE** se utiliza habitualmente para evaluar la confiabilidad de modelos de predicción. Investigaciones realizadas en México, Chile y Perú aplicaron estos parámetros para validar la aplicabilidad del modelo AP-42 y otros métodos de estimación de polvo en vías no pavimentadas (Molina et al., 2015; Vásquez et al., 2019).

De esta manera, el marco estadístico brinda el soporte metodológico necesario para determinar si las concentraciones estimadas por el modelo reflejan adecuadamente la realidad medida en campo. En el presente estudio, estos indicadores serán fundamentales para establecer un **factor de corrección local** que ajuste el modelo AP-42 a las condiciones específicas de Tarija.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

CAPÍTULO III

III. METODOLOGÍA

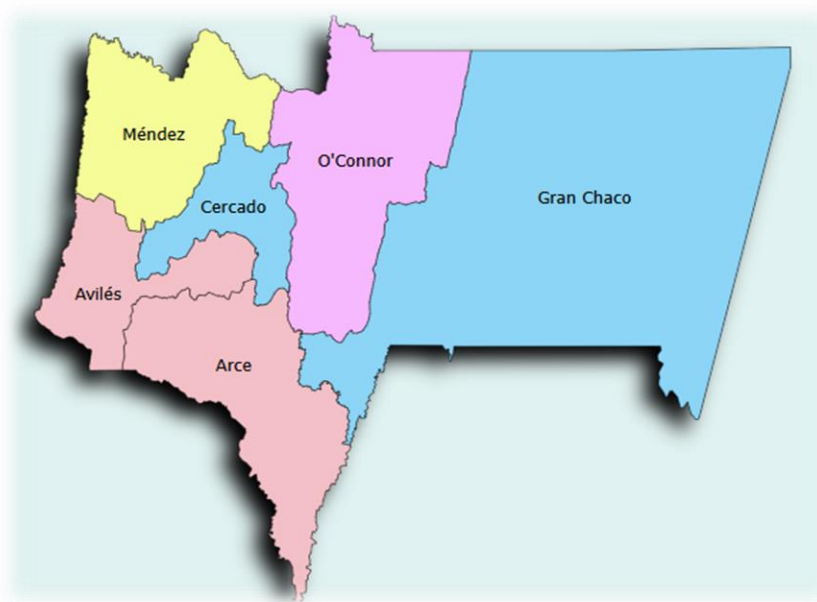
3.1. Área De Estudio

3.1.1. Ubicación Geográfica De La Provincia Cercado

La provincia Cercado se encuentra en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia, y constituye el centro administrativo y urbano más importante de la región. Su capital, la ciudad de Tarija, se ubica aproximadamente a $21^{\circ}31'$ de latitud sur y $64^{\circ}44'$ de longitud oeste, a una altitud promedio de 1.866 m.s.n.m. (INE, 2012). La provincia limita al norte con Méndez, al sur con Avilés, al este con O'Connor y al oeste con Aniceto Arce.

El área de estudio corresponde específicamente a los barrios periurbanos de la ciudad de Tarija que cuentan con vías no pavimentadas. La selección de estos sectores se fundamenta en su importancia ambiental y sanitaria, debido a que la circulación de vehículos en calles de tierra constituye una de las principales fuentes de polvo en suspensión (PM_{10}) en la región.

Figura 3.1. Mapa de Tarija



Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Características Climáticas

El clima de Tarija es templado subhúmedo, con una marcada estacionalidad entre una temporada de lluvias (noviembre a marzo) y una temporada seca (abril a octubre).

- La precipitación media anual es de aproximadamente 650–700 mm, concentrada en verano.
- La temperatura media anual ronda los 18 °C, con máximas que superan los 30 °C en verano y mínimas que pueden descender a 0 °C en invierno (SENAMHI, 2020).

Durante la época seca, la humedad superficial de los suelos se reduce considerablemente, lo que incrementa la facilidad de re suspensión de partículas. Es en este periodo donde se generan las concentraciones más altas de PM₁₀ en la atmósfera, lo cual coincide con el tiempo de ejecución de la presente investigación.

3.1.3. Condiciones Ambientales Y Calidad Del Aire

El Sistema Nacional de Información Ambiental (SNIA, 2021) reporta que Tarija registra, durante la época seca, valores de PM₁₀ entre 150 y 200 µg/m³, superando los límites permisibles establecidos en la normativa boliviana (Ley 1333, RMCA 1995: 150 µg/m³) y multiplicando por cuatro los valores guía de la OMS (50 µg/m³ en 24 h).

Estos altos niveles de material particulado se deben principalmente a tres factores:

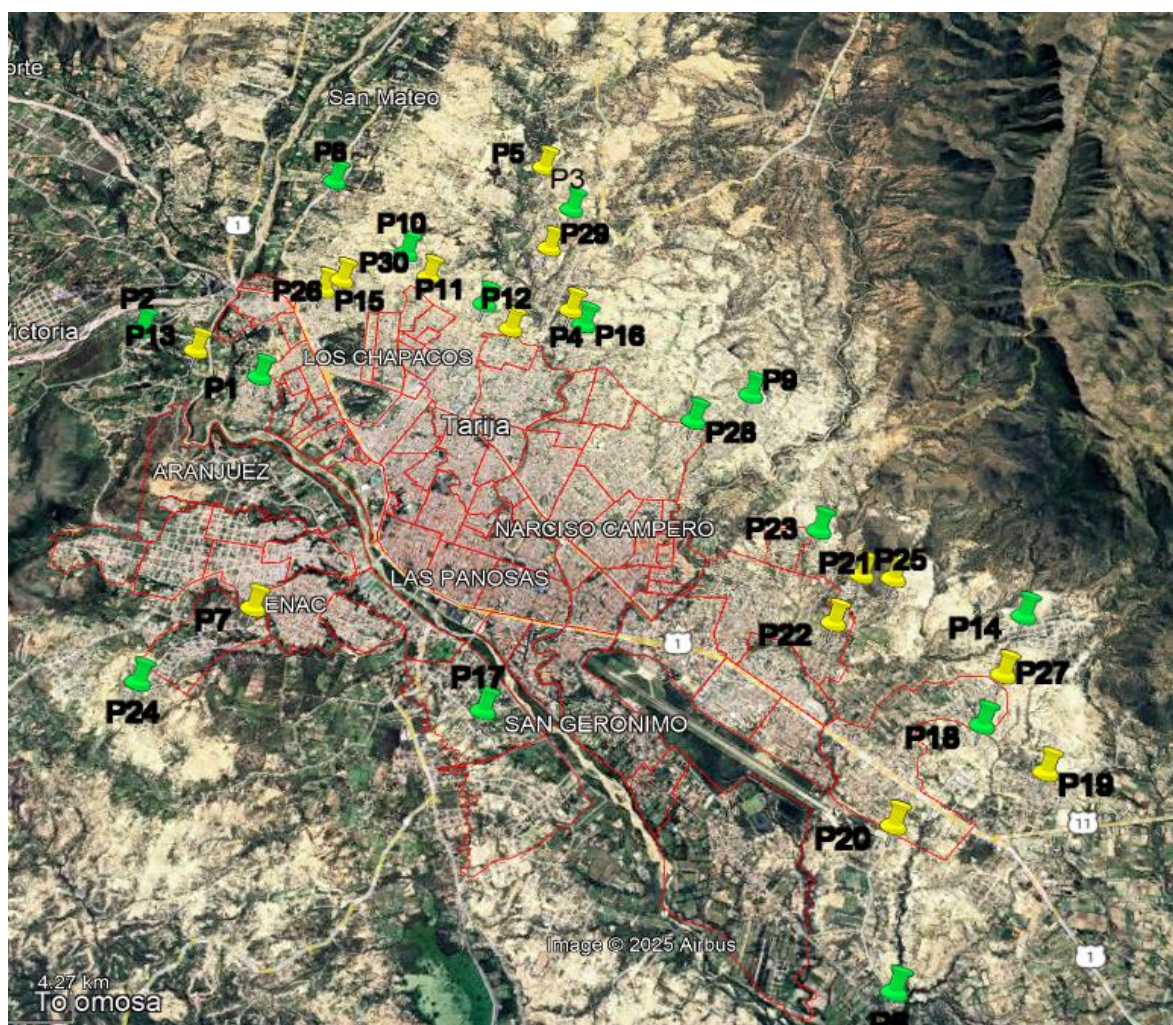
1. La circulación vehicular sobre calles no pavimentadas.
2. La escasa precipitación durante la estación seca.
3. La acción del viento, que dispersa y mantiene en suspensión las partículas finas.

Por ello, la caracterización de emisiones en barrios de la ciudad es fundamental para identificar zonas críticas y diseñar medidas de mitigación.

3.1.4. Selección De Los Barrios De Estudio

Para la investigación se consideraron 30 barrios de la ciudad de Tarija, distribuidos en las diferentes zonas urbanas (norte, sur, este y oeste), con el fin de cubrir la diversidad de condiciones viales y de tránsito.

Figura 3.2. Ubicación De Los Tramos En Estudio



Fuente: Google Earth

Tabla 3.1. Ubicación de puntos.

PUNTO	BARRIO	COORDENADAS	
		ESTE	NORTE
1	Monte Cristo	318052,74 m E	7619954,71 m S
2	Villca	316511,10 m E	7620612,84 m S
3	Japón	321899,05 m E	7622571,28 m S
4	Los laureles	321929,40 m E	7621004,92 m S
5	Monte Sud	321512,61 m E	7623249,01 m S
6	Temporal	325679,01 m E	7612224,93 m S
7	Catedral	318280,54 m E	7616740,37 m S
8	San Mateo	318761,11 m E	7622975,94 m S
9	Tarijeños en Progreso	324207,90 m E	7619749,62 m S
10	Las Flores	319773,35 m E	7621841,55 m S
11	Nueva Jerusalén	320825,83 m E	7621081,76 m S
12	24 de junio	321170,09 m E	7620709,87 m S
13	Obrajes	317214,12 m E	7620333,33 m S
14	Che Guevara	327392,75 m E	7616735,29 m S
15	Zamora	318750,05 m E	7621261,53 m S
16	Trigal	322097,43 m E	7620788,52 m S
17	Miraflores	321054,49 m E	7615470,61 m S
18	Justo Juez	326824,31 m E	7615357,84 m S
19	Jardín el Portillo	327511,64 m E	7614784,61 m S
20	Santa Lucia	325751,46 m E	7614126,97 m S
21	Los Frutales	325877,63 m E	7617221,57 m S
22	Morros Blancos	325149,92 m E	7616642,47 m S
23	Nuevo Amanecer	325009,80 m E	7617862,81 m S
24	Los Cerezos	317038,98 m E	7615769,23 m S

25	8 de marzo	325504,46 m E	7617268,18 m S
26	26 de agosto	318977,06 m E	7621415,80 m S
27	Torrecillas	327107,67 m E	7615991,82 m S
28	Constructor	323496,43 m E	7619379,40 m S
29	Buena Vista	321622,36 m E	7621958,55 m S
30	Oscar/Zamora	320086,22 m E	7621480,84 m S

Fuente: Elaboración Propia

Los criterios de selección fueron:

- Presencia de vías no pavimentadas de uso cotidiano.
- Representatividad geográfica, incluyendo barrios de distintas zonas urbanas.
- Variación en la intensidad de tránsito vehicular, desde barrios residenciales de bajo flujo hasta zonas con mayor actividad comercial.
- Proximidad a áreas sensibles (escuelas, centros de salud, mercados), donde la exposición de la población al polvo es mayor.

3.2. Diseño Del Muestreo

El diseño muestral se elaboró para obtener información representativa de las vías no pavimentadas de la Provincia Cercado (Tarija), asegurando que los tramos elegidos reflejen la variabilidad del tráfico, del tipo de suelo y de las condiciones superficiales propias del área de estudio.

3.2.1. Tamaño Y Distribución De La Muestra

El tamaño de muestra $n = 30$ se determinó por balance entre precisión estadística y recursos disponibles. Con este número se obtiene un error estándar aproximado de $\pm 20\%$ para medias por estrato, suficiente para estudios de campo.

La muestra se dividió en dos subgrupos:

- **15 tramos de calibración:** con MiniVol TAS y aforo simultáneo.
- **15 tramos de validación:** con aforo y medición de variables operativas.

3.2.2. *Definición De Tramos De Muestreo*

En cada barrio se delimitó un tramo de 100 metros lineales, considerado suficiente para caracterizar las condiciones viales y operativamente adecuado para realizar aforos, mediciones de velocidad, muestreos de suelo y monitoreos de calidad de aire.

Figura 3.3. Tramo de Muestreo



Fuente: Google Earth

Cada tramo constituye la unidad de análisis, sobre la cual se aplicaron los procedimientos de campo y laboratorio.

3.2.3. *Procedimiento De Recolección Y Transporte.*

- **Extracción:** Se excavó la capa superficial de 0 a 5 cm, ya que es la fracción más directamente afectada por el tránsito vehicular y responsable de la generación de polvo.

Figura 3.4. Proceso de Extracción de suelo fino



Fuente: Elaboración Propia

- Almacenamiento: El material se colocó en bolsas plásticas herméticas o bolsas gruesas de polietileno, resistentes al rasgado esto para que no pierda material ni contenido de humedad del suelo.
- Transporte: Las muestras se trasladaron en bolsas plásticas hasta el laboratorio de suelos de la UAJMS.

Figura 3.5. Proceso de traslado



Fuente: Elaboración Propia

3.3. Caracterización De Suelos

El análisis de los suelos superficiales es esencial porque constituye la fuente primaria de material particulado en suspensión en vías no pavimentadas. El parámetro más importante para la modelación mediante el AP-42 es el contenido de finos (s), definido como la fracción de partículas menores a 0,075 mm (tamiz N° 200). Este parámetro controla la cantidad de polvo disponible para Re suspensión por el tránsito vehicular (EPA, 2000).

3.3.1. *Contenido De Humedad.*

Al momento de realizar la extracción de la muestra, se separó una pequeña muestra para realizar el contenido de la humedad del suelo. Esta muestra se colocó en una bolsa plástica herméticamente cerrada para evitar la pérdida de humedad.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es uno de los índices de propiedades más significativos, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otros índices de propiedades.

Figura 3.6. Muestra de suelo para contenido de humedad



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2. Contenido de humedad suelo

PUNTO	BARRIO	% contenido de humedad	
		muestras	% promedio
1	Monte Cristo	2,13	2,17
		2,04	
		2,33	
2	Villca	2,87	2,53
		2,45	
		2,28	
3	Japón	2,22	2,29
		2,52	
		2,12	
4	Los laureles	1,51	2,01
		1,87	
		2,65	
5	Monte Sud	1,82	1,54
		1,36	
		1,44	
6	Temporal	2,32	2,43
		2,68	
		2,29	
7	Catedral	1,34	1,27
		1,23	
		1,25	
8	San Mateo	2,02	1,98
		1,98	
		1,93	
9	Tarijeños en Progreso	1,77	1,54
		1,37	
		1,47	
10	Las Flores	1,51	1,70
		1,87	
		1,72	
11	Nueva Jerusalén	2,38	2,35
		2,42	
		2,25	

12	24 de junio	1,82	1,52
		1,36	
		1,37	
13	Obrajes	2,21	2,31
		2,40	
		2,32	
14	Che Guevara	1,34	1,27
		1,23	
		1,25	
15	Samora	2,10	2,11
		2,19	
		2,05	
16	Trigal	1,34	1,27
		1,23	
		1,25	
17	Miraflores	2,87	2,53
		2,45	
		2,28	
18	Justo Juez	1,82	1,54
		1,36	
		1,44	
19	Jardín el Portillo	2,02	1,98
		1,98	
		1,93	
20	Santa Lucia	1,51	1,72
		1,87	
		1,77	
21	Los Frutales	1,34	1,27
		1,23	
		1,25	
22	Morros Blancos	1,94	1,90
		1,86	
		1,90	
23	Nuevo Amanecer	1,51	1,70
		1,87	
		1,72	
24	Los Cerezos	1,77	1,54
		1,37	

		1,47	
25	8 de marzo	2,87	2,53
		2,45	
		2,28	
26	26 de agosto	2,01	1,98
		2,03	
		1,90	
27	Torrecillas	2,10	2,11
		2,19	
		2,05	
28	Constructor	1,51	1,70
		1,87	
		1,72	
29	Buena Vista	1,82	1,52
		1,36	
		1,37	
30	Oscar/Zamora	2,10	2,11
		2,19	
		2,05	

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Análisis Granulométrico Por Tamizado (Método Del Lavado)

Este método, se usa para el material que pasa el tamiz N°10, donde también se puede realizar con una representación menor del peso total, Esto quiere decir que se puede usar un peso de 300 gr. aproximadamente.

La muestra hay que dejar reposar en agua hasta que esta sature completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo. Generalmente se usa un tiempo cómodo de 24 horas o más, si es que se quiere un tiempo más corto utilizar 5 horas.

Sin perder material se introduce la muestra en la malla N°200, luego con ayuda del agua se puede lavar el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

Luego el material que se retiene en la malla N°200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo y proceder a tamizar por las mallas N°40 y N°200.

Pesar el material retenido en cada malla dispuesta para el fin.

De la misma manera se tiene que corregir los porcentajes que pasan de acuerdo a la formula mencionada en el párrafo anterior.

Figura 3.7. Proceso del lavado y tamizado de suelo



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3. Valores % pasa tamiz N°200

Punto	Barrio	s = % finos
P1	Monte Cristo	77,14
P2	Villca	75,50
P3	Japón	77,27
P4	Los laureles	80,17
P5	Monte Sud	78,38
P6	Temporal	76,56
P7	Catedral	77,39
P8	San Mateo	73,62
P9	Tarijeños en Progreso	79,13

P10	Las Flores	80,12
P11	Nueva Jerusalén	78,61
P12	24 de junio	72,56
P13	Obrajes	71,55
P14	Che Guevara	72,60
P15	Samora	72,21
P16	Trigal	77,08
P17	Miraflores	76,47
P18	Justo Juez	75,50
P19	Jardín el Portillo	75,88
P20	Santa Lucia	77,39
P21	Los Frutales	76,34
P22	Morros Blancos	74,66
P23	Nuevo Amanecer	78,21
P24	Los Cerezos	74,53
P25	8 de marzo	73,93
P26	26 de agosto	79,17
P27	Torrecillas	76,57
P28	Constructor	81,46
P29	Buena Vista	75,22
P30	Oscar/Zamora	78,33

Fuente: Elaboración Propia

% que pasa el tamiz N.º 200 → valor adoptado como s en la ecuación AP-42.

3.3.3. Límites De Atterberg

3.3.3.1. Limite Liquido

Figura 3.8. Determinación de limite liquido Equipo Casagrande



Fuente: Elaboración Propia

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico.

Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeado se deposite en la taza de bronce de la máquina Casagrande y se divida en dos porciones simétricas separadas de 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Tabla 3.4. Valores del LL con el Copa Casagrande

Punto	Barrio	LL
P1	Monte Cristo	33
P2	Villca	30
P3	Japón	39
P4	Los laureles	37
P5	Monte Sud	33
P6	Temporal	25
P7	Catedral	22
P8	San Mateo	24
P9	Tarijeños en Progreso	32
P10	Las Flores	34
P11	Nueva Jerusalén	35
P12	24 de junio	36
P13	Obrajes	33
P14	Che Guevara	32
P15	Samora	34
P16	Trigal	32
P17	Miraflores	34
P18	Justo Juez	28
P19	Jardín el Portillo	29
P20	Santa Lucia	36
P21	Los Frutales	28
P22	Morros Blancos	26
P23	Nuevo Amanecer	29
P24	Los Cerezos	33
P25	8 de marzo	31
P26	26 de agosto	38
P27	Torrecillas	30
P28	Constructor	34
P29	Buena Vista	40
P30	Oscar/Zamora	41

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3.2.Limite Plástico

Figura 3.9. Determinación Limite Plástico



Fuente: Elaboración Propia

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos

El límite plástico es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en homogéneo, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1 cm de largo y no puedan ser re amasados ni reconstituidos.

Tabla 3.5. Valores de LP

Punto	Barrio	LP
P1	Monte Cristo	23
P2	Villca	22
P3	Japón	34

P4	Los laureles	28
P5	Monte Sud	24
P6	Temporal	21
P7	Catedral	19
P8	San Mateo	20
P9	Tarijeños en Progreso	28
P10	Las Flores	28
P11	Nueva Jerusalén	25
P12	24 de junio	28
P13	Obrajes	28
P14	Che Guevara	27
P15	Samora	28
P16	Trigal	28
P17	Miraflores	28
P18	Justo Juez	17
P19	Jardín el Portillo	18
P20	Santa Lucia	23
P21	Los Frutales	18
P22	Morros Blancos	19
P23	Nuevo Amanecer	21
P24	Los Cerezos	21
P25	8 de marzo	21
P26	26 de agosto	23
P27	Torrecillas	19
P28	Constructor	19
P29	Buena Vista	25
P30	Oscar/Zamora	25

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4. Clasificación De Suelo

La clasificación de los suelos se basa en los resultados de las pruebas físicas, mecánicas u otra información independiente del origen y tamaño de las partículas. La granulometría y la consistencia de los suelos son estudios que se utilizan para clasificar suelos.

El propósito de cualquier clasificación es ser capaz de organizar el conocimiento de tal manera que las propiedades de los suelos puedan ser registradas y sus relaciones entendidas más fácilmente para un objetivo específico. Existen dos sistemas de clasificación de suelos:

- AASHTO
- SUCS

Resumen de Resultados

Tabla 3.6. Resumen de Resultados de la Clasificación del suelo

Punto	LL	LP	IP	IG	SUCS	AASHTO
P1	33	23	10	8,00	CL	A-4
P2	30	22	8	8,00	CL	A-4
P3	39	34	4	8,00	ML-CL	A-4
P4	37	28	9	8,00	CL	A-4
P5	33	24	9	8,00	CL	A-4
P6	25	21	4	8,00	ML-CL	A-4
P7	22	19	3	8,00	ML	A-4
P8	24	20	4	8,00	ML	A-4
P9	32	28	4	8,00	ML-CL	A-4
P10	34	28	7	8,00	ML-CL	A-4
P11	35	25	10	8,00	CL	A-4
P12	36	28	8	8,00	CL	A-4
P13	33	28	6	7,00	ML-CL	A-4
P14	32	27	5	8,00	ML-CL	A-4
P15	34	28	6	7,00	ML-CL	A-4
P16	32	28	4	8,00	ML-CL	A-4
P17	34	28	6	8,00	ML-CL	A-4
P18	28	17	11	8,00	CL	A-6
P19	29	18	11	8,00	CL	A-6
P20	36	23	13	9,00	CL	A-6
P21	28	18	10	8,00	CL	A-4
P22	26	19	8	8,00	CL	A-4
P23	29	21	8	8,00	CL	A-4

P24	33	21	12	9,00	CL	A-6
P25	31	21	10	8,00	CL	A-4
P26	38	23	15	10,00	CL	A-6
P27	30	19	11	8,00	CL	A-6
P28	34	19	16	10,00	CL	A-6
P29	40	25	15	10,00	CL	A-6
P30	41	25	17	11,00	CL	A-7-6

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Aforo Vehicular, Velocidades Y Obtención De Variables De Operación.

El análisis de emisiones en vías no pavimentadas requiere cuantificar las variables de operación del tránsito que influyen directamente en la generación y Re suspensión de polvo: el volumen de tránsito (VPD), la velocidad promedio de operación (V85) y el peso promedio vehicular (W).

Estas variables, junto con el porcentaje de finos (s) del material de rodadura, conforman los insumos del modelo AP-42 (Sección 13.2.2 – Unpaved Roads) propuesto por la Environmental Protection Agency (EPA, 2020).

En este apartado se detallan los fundamentos teóricos, los métodos de campo y gabinete, y los procedimientos de control de calidad aplicados para la obtención de dichas variables en los 30 tramos seleccionados dentro de la Provincia Cercado (Tarija), durante la época seca, cuando las condiciones ambientales favorecen la emisión de material particulado (PM₁₀).

3.4.1. Importancia Del Aforo Vehicular

Un aforo vehicular es la medición sistemática del número de vehículos que circulan por una vía en un intervalo de tiempo determinado.

Su finalidad es conocer la intensidad de tránsito, la composición de la flota, y su distribución temporal para caracterizar la operación del sistema vial (ABC, 2018).

En el contexto de emisiones de polvo, el aforo permite cuantificar la frecuencia de paso de vehículos, que constituye la fuente mecánica de Re suspensión del material suelto depositado sobre la superficie del camino (EPA, 2020).

Por tanto, la medición rigurosa de estas variables es esencial para obtener una estimación confiable de emisiones y garantizar la validez del modelo en el contexto de Tarija.

3.4.2. Variables De Operación Y Su Influencia En Las Emisiones

El modelo AP-42 establece que las emisiones de polvo (E) dependen de tres variables de operación principales (EPA, 2020):

$$E = k * \left(\frac{s}{12}\right)^a * \left(\frac{W}{3}\right)^b * \left(\frac{V}{30}\right)^c$$

Donde:

- s: contenido de finos en el material de rodadura (% que pasa el tamiz 0,075 mm)
- W: peso promedio de los vehículos (t)
- V: velocidad promedio de circulación (km/h)
- k, a, b, c: constantes empíricas que dependen del tamaño de partícula considerado.

3.4.3. Aforo Vehicular Clasificado (V12h Y VPD)

El volumen vehicular expresa la cantidad de vehículos que pasan por un punto o tramo de una vía durante un tiempo dado.

De acuerdo con la ABC (2018) y la FHWA (2016), la variable más utilizada para análisis es el Volumen Diario Promedio (VPD), definido como el número total de vehículos que transitan por una sección en 24 horas, dividido entre el número de días observados.

Dado que los estudios en zonas urbanas o periurbanas presentan mayor flujo diurno, se aplicó un factor de expansión (Fe) para estimar el tránsito diario a partir de mediciones de 12 horas.

a) Procedimiento:

Para determinar el volumen de tránsito, se realizaron aforos manuales clasificados de 12 horas continuas (de 06:00 a 18:00 horas) en los 30 tramos seleccionados.

Cada vehículo fue clasificado según su tipo, siguiendo la nomenclatura de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2018): motocicleta, automóvil, vagoneta/SUV, camioneta, micro o minibús, bus mediano, camión de dos ejes y camión de tres o más ejes.

Los aforos se efectuaron en días laborales (lunes a sábado), evitando feriados, lluvias o riegos artificiales.

Durante cada jornada se empleó un encuestador por tramo, equipado con planillas impresas.

El punto de observación se ubicó en una zona recta del camino, con buena visibilidad (≥ 80 m), y alejada de intersecciones o accesos laterales.

Figura 3.10. Aforo vehicular



Fuente: Elaboración Propia

b) Registro y clasificación.

El conteo se realizó en intervalos de 15 minutos.

En cada intervalo se registró el número de vehículos por tipo.

En vías de doble sentido, se utilizaron planillas separadas por sentido y los valores se sumaron posteriormente.

El volumen total de 12 horas se calculó mediante:

$$V_{12h} = \sum_{i=1}^{\infty} N_i$$

donde N_i representa la cantidad de vehículos de la clase i .

Tabla 3.7. Resumen Volumen Diario Promedio

PUNTO	BARRIO	VPD (veh)
1	Monte Cristo	494
2	Villca	407
3	Japón	510
4	Los laureles	670
5	Monte Sud	480
6	Temporal	290
7	Catedral	246
8	San Mateo	345
9	Tarijeños en Progreso	668
10	Las Flores	868
11	Nueva Jerusalén	519
12	24 de junio	489
13	Obrajes	468
14	Che Guevara	288
15	Samora	450
16	Trigal	562
17	Miraflores	463
18	Justo Juez	336

19	Jardín el Portillo	355
20	Santa Lucia	322
21	Los Frutales	272
22	Morros Blancos	304
23	Nuevo Amanecer	573
24	Los Cerezos	370
25	8 de marzo	385
26	26 de agosto	688
27	Torrecillas	391
28	Constructor	815
29	Buena Vista	397
30	Oscar/Zamora	624

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4. Medición De Velocidad De Operación (V85)

La velocidad de operación refleja las condiciones reales de circulación y depende de la geometría de la vía, la textura del suelo y la percepción de seguridad del conductor.

El parámetro V85 (percentil 85) es ampliamente utilizado en ingeniería de tránsito, ya que representa la velocidad que no es superada por el 85 % de los vehículos.

En el modelo AP-42, la velocidad se incluye con exponente 0,5, indicando que las emisiones aumentan proporcionalmente con la raíz cuadrada de la velocidad media (EPA, 2020).

a) Procedimiento

Las velocidades se midieron con una pistola radar de precisión ± 1 km/h, colocada a una altura de 1,2 - 1,5 m respecto al eje del camino. Las mediciones se realizaron en horarios representativos.

En cada tramo se registraron al menos 100 observaciones de vehículos en flujo libre, es decir, sin interferencias por cruces o detenciones.

Se excluyeron las observaciones atípicas (frenadas o maniobras de giro)

Figura 3.11. Aforo de velocidad con pistola radar



Fuente: Elaboración Propia

b) Cálculo de V85

Los datos de velocidad se ordenaron de menor a mayor y se aplicó la siguiente fórmula:

$$P = 0,85(n + 1)$$

donde n es el número total de observaciones.

Tabla 3.8. Resumen V85

PUNTO	BARRIO	V (85) Km/h
1	Monte Cristo	30
2	Villca	31
3	Japón	35
4	Los laureles	41
5	Monte Sud	29
6	Temporal	47
7	Catedral	32

8	San Mateo	35
9	Tarijeños en Progreso	37
10	Las Flores	43
11	Nueva Jerusalén	35
12	24 de junio	29
13	Obrajes	38
14	Che Guevara	32
15	Samora	35
16	Trigal	33
17	Miraflores	39
18	Justo Juez	30
19	Jardín el Portillo	36
20	Santa Lucia	33
21	Los Frutales	32
22	Morros Blancos	28
23	Nuevo Amanecer	46
24	Los Cerezos	34
25	8 de marzo	28
26	26 de agosto	37
27	Torrecillas	44
28	Constructor	47
29	Buena Vista	32
30	Oscar/Zamora	35

Fuente: Elaboración Propia

3.4.5. Composición Vehicular Y Peso Promedio (W)

El peso promedio vehicular influye directamente en el grado de compactación y en la magnitud de las fuerzas de fricción que actúan sobre el material superficial.

Vehículos más pesados generan mayor presión sobre el camino y, en consecuencia, mayor emisión de polvo.

Por esta razón, el modelo AP-42 incluye la variable W elevada a la potencia 0,5

a) Determinación del peso promedio

A partir de los resultados del aforo clasificado, se determinó la proporción de vehículos por clase (f_i) y se asignó a cada tipo un peso medio (w_i) de acuerdo con valores de la ABC (2018).

Tabla 3.9. Pesos Medio

Categoría	Tipo de vehículo	Peso promedio (t)	Fuente / Comentario
Vehículos livianos			
1	Automóvil	1,3	Auto pequeño de pasajeros.
2	Vagoneta	1,5	Similar a SUV o sedán familiar.
3	Camioneta	2	Pickup o 4×4 liviana.
4	Minibús	3	12–20 pasajeros, urbano.
5	Microbús	5	Capacidad 25–30 pasajeros.
Vehículos pesados (camiones y buses)			
6	Bus mediano	8	35 pasajeros promedio,
7	Camión mediano	10	2 ejes, carga media.
8	Camión grande (2 ejes)	12	Eje trasero doble.
9	Camión grande (3 ejes)	18	Tracto rígido.
10	Tráiler o semirremolque	20	Articulado, larga distancia.
Otros			
11	Motocicleta	0,15	Promedio 150 kg.

Fuente: ABC (2018)

El peso promedio ponderado del flujo vehicular se calculó como:

$$W = \sum_{i=1}^{\infty} f_i w_i$$

Este valor representa el peso medio de los vehículos que transitan por el tramo y se usa directamente en la ecuación AP-42.

Tabla 3.10. Pesos Promedios

Punto	Barrio	Wprom(Ton)
1	Monte Cristo	1,39
2	Villca	1,56
3	Japón	1,42
4	Los laureles	1,42
5	Monte Sud	1,29
6	Temporal	2,31
7	Catedral	2,14
8	San Mateo	1,86
9	Tarijeños en Progreso	1,66
10	Las Flores	2,13
11	Nueva Jerusalén	1,96
12	24 de junio	1,78
13	Obrajes	1,65
14	Che Guevara	1,37
15	Samora	1,31
16	Trigal	1,71
17	Miraflores	1,67
18	Justo Juez	1,54
19	Jardín el Portillo	1,80
20	Santa Lucia	2,47
21	Los Frutales	1,67
22	Morros Blancos	1,66
23	Nuevo Amanecer	1,56
24	Los Cerezos	1,70
25	8 de marzo	1,61
26	26 de agosto	1,76
27	Torrecillas	1,73
28	Constructor	2,76
29	Buena Vista	1,92
30	Oscar/Zamora	1,96

Fuente: Elaboración Propia

3.4.6. Cálculo De Emisiones Con El Modelo AP-42

Para cada tramo de 100 m se calcularon las emisiones mediante las siguientes expresiones:

1. Emisión por vehículo y kilometro (g/VKT):

$$E = 1,8 * \left(\frac{S}{12}\right)^{0,8} * \left(\frac{W}{3}\right)^{0,5} * \left(\frac{V}{30}\right)^{0,5}$$

Tabla 3.11. Emisiones estimadas por el modelo AP-42

Punto	Barrio	E(g/VKT)
1	Monte Cristo	5,429
2	Villca	5,749
3	Japón	5,938
4	Los laureles	6,591
5	Monte Sud	5,217
6	Temporal	8,709
7	Catedral	6,953
8	San Mateo	6,535
9	Tarijeños en Progreso	6,716
10	Las Flores	8,290
11	Nueva Jerusalén	7,056
12	24 de junio	5,744
13	Obrajes	6,273
14	Che Guevara	5,312
15	Samora	5,408
16	Trigal	6,309
17	Miraflores	6,736
18	Justo Juez	5,613
19	Jardín el Portillo	6,673
20	Santa Lucia	7,608
21	Los Frutales	6,082
22	Morros Blancos	5,579
23	Nuevo Amanecer	7,205
24	Los Cerezos	6,209

25	8 de marzo	5,448
26	26 de agosto	6,934
27	Torrecillas	7,288
28	Constructor	10,008
29	Buena Vista	6,450
30	Oscar/Zamora	7,056

Fuente: Elaboración Propia

2. Emisión diaria total del tramo (g/día)

$$E_{dia} = E * VPD * L$$

donde L=0,10 km es la longitud del tramo.

Tabla 3.12. Emisiones diarias estimadas

Punto	Barrio	E(g/día)
1	Monte Cristo	268,18
2	Villca	234,00
3	Japón	302,84
4	Los laureles	441,63
5	Monte Sud	250,43
6	Temporal	252,55
7	Catedral	171,04
8	San Mateo	225,47
9	Tarijeños en Progreso	448,63
10	Las Flores	719,60
11	Nueva Jerusalén	366,19
12	24 de junio	280,90
13	Obrajes	293,59
14	Che Guevara	152,97
15	Samora	243,37
16	Trigal	354,58
17	Miraflores	311,88
18	Justo Juez	188,61
19	Jardín el Portillo	236,89

20	Santa Lucia	244,97
21	Los Frutales	165,43
22	Morros Blancos	169,61
23	Nuevo Amanecer	412,85
24	Los Cerezos	229,75
25	8 de marzo	209,73
26	26 de agosto	477,03
27	Torrecillas	284,98
28	Constructor	815,62
29	Buena Vista	256,07
30	Oscar/Zamora	440,30

Fuente: Elaboración Propia

3.5. Calibración Del Modelo AP-42

El modelo AP-42 (EPA, 2020) proporciona factores de emisión de polvo desarrollados a partir de estudios realizados principalmente en Estados Unidos.

Por tanto, su aplicación directa en otras regiones puede introducir diferencias debido a variaciones locales en la composición del suelo, el clima y las características del tránsito.

En consecuencia, es necesario calibrar el modelo para ajustarlo a las condiciones específicas de la Provincia Cercado (Tarija).

El objetivo de esta etapa fue calibrar el modelo AP-42 mediante la comparación entre las emisiones estimadas a partir de los parámetros operativos del tránsito (obtenidos en el apartado 3.4) y las concentraciones reales de material particulado (PM_{10}) medidas con el muestreador MiniVol TAS.

De esta forma, se obtuvo un factor de calibración local (K) que permite adaptar el modelo a las condiciones locales.

3.5.1. Descripción Del Equipo Minivol Tas

El MiniVol TAS (Portable Air Sampler) es un equipo de muestreo de bajo volumen diseñado para medir material particulado en suspensión (PM_{10}) en ambientes exteriores.

Opera con un caudal constante de 5 L/min (0,005 m³/min) mediante una bomba de diafragma y un sistema de control de flujo electrónico.

El aire aspirado pasa por un separador inercial que retiene las partículas mayores al diámetro aerodinámico seleccionado (PM₁₀) y deposita las partículas menores en un filtro de fibra de cuarzo o teflón.

Figura 3.12. Filtro de Fibra



Fuente: Elaboración Propia

3.5.2. Especificaciones técnicas del MiniVol TAS



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MINIVOL TAS



Descripción general y funciones

- El MiniVol es un muestreador de aire **portátil**, diseñado para muestreo de materia particulada (TSP, PM10, PM2.5) y gases (modo integrado).
- Su diseño lo hace ideal para muestreos en campo — incluso en sitios remotos o sin acceso a electricidad — ya que puede operar con **batería recargable** o con alimentación AC/DC.
- Tiene un **temporizador programable** (timer) con capacidad de configurar múltiples ciclos ("runs") en 24 horas o durante una semana.
- Cuenta con un **control de flujo constante** + un medidor de flujo (flowmeter), lo que asegura que el caudal de muestreo se mantenga uniforme.
- Incluye un totalizador de tiempo de operación ("elapsed time totalizer") para registrar cuántas horas ha funcionado la bomba.

Parámetros de muestreo / operación

- **Caudal nominal:** 5 litros por minuto (5 L/min) para muestreo de partículas.
- El equipo puede operar con **impactadores (size-separator / preseparator)** con punto de corte para:
 - PM10 (partículas $\leq 10 \mu\text{m}$)
 - PM2.5 (partículas $\leq 2.5 \mu\text{m}$)
 - Si no se coloca impactador, permite muestreo de partículas totales suspendidas (TSP).
- En modo "gas sampling" ("integrated gas sampling mode"), puede usarse para muestrear gases/no-reactivos mediante bolsas de muestreo ("bag modules") o canisters, controlando llenado mediante circuito programable ("intervalometer / pulse circuit").

Características físicas y eléctricas

Característica	Valor / nota
Dimensiones del muestreador	254 mm (largo) × 300 mm (ancho) × 178 mm (profundidad)
Peso del muestreador (armado)	~ 4.5 kg
Tamaño del filtro / portafiltro	filtros de 47 mm de diámetro
Alimentación eléctrica	Batería recargable (ión de litio en la versión comercial referida) 14.8 V / 118 Wh
Fuente alterna / cargador	entrada 100–240 VAC, 47–63 Hz (compatible con red eléctrica estándar)

3.5.3. Procedimiento De Medición De PM_{10}

El muestreo con el MiniVol TAS se realizó en 15 tramos seleccionados de los 30 puntos totales del estudio, coincidiendo con los mismos sitios donde se efectuaron los aforos vehiculares de 12 horas y la caracterización del suelo.

Los procedimientos se desarrollaron bajo las siguientes condiciones:

a) Instalación del equipo

- El MiniVol TAS se colocó sobre una base fija, a una altura de $2,0 \pm 0,2$ m respecto al nivel del suelo.

Figura 3.13. Instalación del MiniVol Tas



Fuente: Elaboración Propia

- El muestreador se orientó de modo que el cabezal de entrada no estuviera frente a obstáculos ni árboles cercanos.

b) Duración y horario de muestreo

El periodo de muestreo fue de 12 horas continuas (06:00–18:00 horas), coincidiendo exactamente con el horario del aforo vehicular, de manera que las concentraciones obtenidas representaran el mismo intervalo de exposición al tránsito.

c) Preparación y manejo de filtros

- Los filtros se acondicionaron durante 24 horas en una balanza analítica a temperatura y humedad controladas (20–25 °C y 40–50 % HR).

- Se registró el peso inicial (W_1) antes del muestreo y el peso final (W_2) después de la exposición, una vez que el filtro fue nuevamente estabilizado.
- La masa de partículas retenidas se determinó como:

$$\Delta W = W_2 - W_1$$

d) Cálculo de la concentración de PM_{10}

La concentración se calculó de acuerdo con la siguiente expresión (EPA, 2016):

$$C_{medida} = \frac{\Delta W}{Q * t}$$

donde:

C_{medida} = concentración media de PM_{10} ($\mu g/m^3$)

ΔW = masa retenida (μg)

Q = caudal del equipo (m^3/min)

t = tiempo total de muestreo (min)

El resultado obtenido representa la concentración promedio de material particulado durante las 12 horas de exposición.

Figura 3.14. MiniVol Tas utilizado



Fuente: Elaboración Propia

3.5.4. Emisiones Medidas Por El Laboratorio ENVIROLAB (Laboratorio Y Monitoreo)

Tabla 3.13. Informe ENVIROLAB



PIE-PR02-FR01/2023-10-16/Rev.0

INFORME: M 224/24

Nº cotización: 195/2024

Inspección: Aire - Material particulado

Página 1 de 2



Escanee el código para verificar la autenticidad del informe

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

NOMBRE: Héctor Ariel Ortega Oropeza

DIRECCIÓN: Atn. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Cercado - Tarija

Tarija - Bolivia

PROCEDENCIA: Análisis de la modelación de las emisiones de polvo en carreteras no pavimentadas aplicada a la red departamental de Tarija.

FECHA DE RECEPCIÓN DE DATOS:

miércoles, 24 de julio de 2024

FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:

lunes, 12 de Agosto de 2024

DATOS Y RESULTADOS OBTENIDOS:

IDENTIFICACIÓN INICIAL									DATOS DE LABORATORIO			L.P. RMCA ANEXO 1		
CÓDIGO CLIENTE	COORDENADAS (UTM)	FECHA Y HORA INICIO	FECHA Y HORA FINAL	ALTURA (m.s.n.m.)	TEMP. (°C)	PRESIÓN (mm Hg)	CAUDAL (m³/día)*	TIEMPO MUESTREO (horas)	CONCENTRACIÓN EN UN DÍA (mg/m³)			260 µg/m³	150 µg/m³	-
									RESULTADOS (µg/m³)					
									PTS	PM 10	PM 2,5	PTS	PM 10	PM 2,5
AI-01	318052.74 E 7619954.71 N	2024-07-01 06:00	2024-07-01 18:00	1902	21,0	620,7	5,61	12,05	PNS	0,188	PNS	PNS	186,7	PNS
AI-02	316511.10 E 7620612.84 N	2024-07-02 06:00	2024-07-02 18:00	1985	23,0	620,7	5,62	12,08	PNS	0,132	PNS	PNS	132,3	PNS
AI-03	321899.05 E 7622571.28 N	2024-07-03 06:00	2024-07-03 18:00	1930	21,0	620,7	5,64	12,02	PNS	0,196	PNS	PNS	195,5	PNS
AI-04	325679.01 E 7612224.93 N	2024-07-04 06:00	2024-07-04 18:00	1829	20,0	620,2	5,61	12,02	PNS	0,175	PNS	PNS	174,6	PNS
AI-05	318761.11 E 7622975.94 N	2024-07-05 06:00	2024-07-05 18:00	1953	21,0	621,8	5,62	12,02	PNS	0,102	PNS	PNS	101,8	PNS
AI-06	324207.90 E 7619749.62 N	2024-07-06 06:00	2024-07-06 18:00	1944	22,0	620,7	5,64	12,02	PNS	0,284	PNS	PNS	283,6	PNS
AI-07	319773.35 E 7621841.55 N	2024-07-08 06:00	2024-07-08 18:00	1933	21,0	620,7	5,64	12,02	PNS	0,398	PNS	PNS	398,1	PNS
AI-08	320825.83 E 7621081.76 N	2024-07-09 06:00	2024-07-09 18:00	1911	23,0	621,7	5,64	12,02	PNS	0,246	PNS	PNS	246,3	PNS
AI-09	327392.75 E 7616735.29 N	2024-07-10 06:00	2024-07-10 18:00	1926	21,0	620,7	5,64	12,02	PNS	0,074	PNS	PNS	73,5	PNS
AI-10	322097.43 E 7620788.52 N	2024-07-11 06:00	2024-07-11 18:00	1900	21,0	621,1	5,62	12,02	PNS	0,187	PNS	PNS	187,4	PNS
AI-11	321054.49 E 7615470.61 N	2024-07-12 06:00	2024-07-12 18:00	1862	20,0	620,7	5,61	12,02	PNS	0,143	PNS	PNS	143,3	PNS
AI-12	326824.31 E 7615357.84 N	2024-07-13 06:00	2024-07-13 18:00	1869	22,0	621,3	5,61	12,02	PNS	0,146	PNS	PNS	145,9	PNS
AI-13	325009.80 E 7617862.81 N	2024-07-15 06:00	2024-07-15 18:00	1839	21,0	620,7	5,62	12,02	PNS	0,220	PNS	PNS	219,8	PNS
AI-14	317038.98 E 7615769.23 N	2024-07-16 06:00	2024-07-16 18:00	1957	20,0	619,3	5,64	12,02	PNS	0,170	PNS	PNS	169,6	PNS
AI-15	323496.43 E 7619379.40 N	2024-07-17 06:00	2024-07-17 18:00	1917	21,0	620,7	5,61	12,02	PNS	0,410	PNS	PNS	410,4	PNS

REFERENCIAS DEL INFORME:

* C.N. se refiere a Condiciones Normales de temperatura = 282,15°K y presión=760mmHg
PNS, se refiere a ParámetroNo Solicitado.

CÓDIGO, DESCRIPCIÓN Y OBSERVACIONES DEL PUNTO DE MEDICIÓN:

AI-01 Barrio Monte Cristo.
AI-02 Barrio Los Villca.
AI-03 Barrio Japon.
AI-04 Barrio Temporal.
AI-05 Barrio San Mateo.
AI-06 Barrio Tarijeños en Progreso.
AI-07 Barrio Las Flores.
AI-08 Barrio Nueva Jerusalen.
AI-09 Barrio Che Guevara.
AI-10 Barrio Trigal.
AI-11 Barrio Miraflores.
AI-12 Barrio Justo Juez.
AI-13 Barrio Nuevo Amanecer.
AI-14 Barrio Los Cerezos.
AI-15 Barrio Constructor.

Obs.:

Muestreo realizado en días despejados con vientos leves, predominantes en dirección NE-SW.

MÉTODO EMPLEADO:

En cumplimiento con la ley 1333 y su respectiva Reglamentación en Materia de Contaminación Atmosférica se realizó el monitoreo de Calidad de Aire en los componentes de material particulado (PTS), partículas menores a 10 µm (PM10) y partículas menores a 2,5 µm (PM2,5).

Además nuestro procedimiento se basa en los métodos de referencia EPA: Apéndice B a la Parte 50 - Método de referencia para la determinación de materia particulada suspendida en la atmósfera (método de alto volumen). Apéndice J de la Parte 50 - Método de referencia para la determinación de material particulado como PM10 en la atmósfera. Apéndice L de la Parte 50 - Método de referencia para la determinación de partículas finas como PM2.5 en la atmósfera.

En consecuencia, se aplica la norma NB 62014:2018 Calidad de aire - Determinación de material particulado en suspensión con un diámetro aerodinámico equivalente menos a 10 y 2,5 micrómetros (PM10 y PM2,5) - Muestreo activo - Método gravimétrico.

EQUIPO UTILIZADO:

El equipos empleados es el muestreador de Partículas TAS-5.0 PM-10, código interno 299, 298, 297, 296, 295, 294, 293, 292, 291, 290, 289, 288, 287, 286, y 285.

FECHA CALIBRACIÓN DE EQUIPO:

lunes, 24 de junio de 2024

SUPERVISIÓN A CARGO DE:

Sr. Hectór A. Ortega O.

INSPECTOR (ES) DE ENVIROLAB:

Jhonatan Quintana Orellana

Armando Paco Bravo

RESPONSABLE DE ELABORACIÓN DE INFORME:

Armando Paco Bravo

FIN DEL DOCUMENTO


FIRMA AUTORIZADA
Jorge L. Lora Fernández
SUPERVISOR DE MONITOREO


FIRMA AUTORIZADA
Erick F. Flores Bolaños
JEFE DE MONITOREO


FIRMA AUTORIZADA
Aldo A. Mercado Gutiérrez
GERENTE ENVIROLAB S.R.L.

Este documento no podrá ser copiado ni distribuido, sin una autorización escrita por ENVIROLAB S.R.L.
Calle Melchor Daza N° 38 esq. Colombia – Ciudad Satélite | Potosí – Bolivia | T. +591 26226838 | C. +591 76763218 | info@envirolab.com.bo

Las mediciones de concentración de PM_{10} obtenidas con el equipo MiniVol TAS serán posteriormente comparadas con las emisiones estimadas mediante el modelo AP-42.

Esta comparación permitirá establecer, en el Capítulo IV, el factor de calibración local (K) y evaluar la concordancia entre las concentraciones estimadas y las medidas en campo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

CAPÍTULO IV

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Análisis Y Resultados

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir de las diferentes actividades de campo y de laboratorio descritas en la metodología.

El propósito principal de este análisis es evaluar la aplicabilidad del modelo AP-42 (EPA) en la estimación de emisiones de polvo para las condiciones locales de la Provincia Cercado, Tarija, considerando las características del suelo, el tránsito vehicular y las condiciones ambientales durante la época seca.

Los resultados se presentan en el mismo orden en que se desarrolló el trabajo metodológico, iniciando con la caracterización física del material superficial de las vías, seguida del aforo vehicular y la determinación de velocidades de operación, la estimación del peso promedio vehicular (W), y finalmente la aplicación del modelo AP-42 para la obtención de las emisiones estimadas.

Posteriormente, se analizan las concentraciones medidas con el equipo MiniVol TAS, y se realiza la calibración y validación del modelo a través de la comparación entre los valores teóricos y los datos medidos en campo.

El análisis comprende tanto la interpretación de los resultados individuales de cada variable como su interrelación, destacando la influencia que ejercen el porcentaje de finos, la velocidad de circulación y la intensidad de tránsito en las concentraciones de material particulado PM_{10} .

El procesamiento estadístico incluyó análisis descriptivo, correlacional y de regresión, con el propósito de determinar el grado de influencia de cada variable sobre la generación de polvo y su dispersión atmosférica.

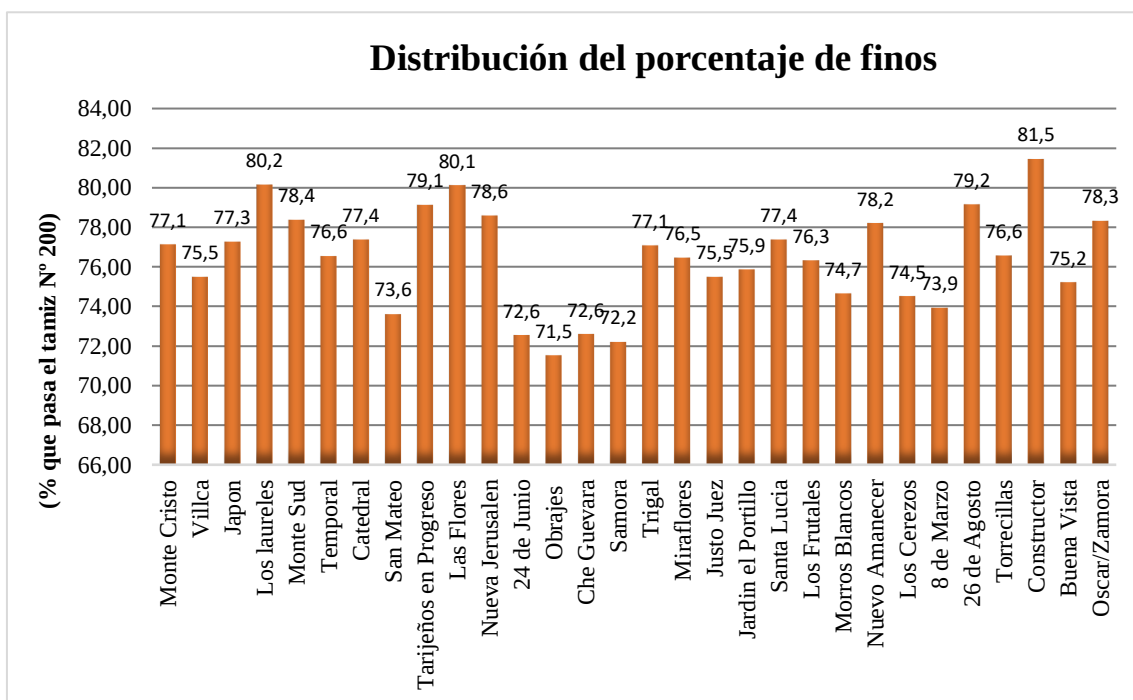
4.2. Resultados De La Caracterización Física Del Camino

4.2.1. Análisis Granulométrico Y Clasificación Del Suelo

Los ensayos granulométricos realizados en laboratorio mostraron que los suelos superficiales de los tramos evaluados presentan un alto contenido de partículas finas, con valores actualizados comprendidos entre 71,55 % y 81,5 % del material que pasa el tamiz N.º 200 (0,075 mm).

Estos resultados indican una predominancia de suelos arcillo-limosos (CL-ML) según la clasificación SUCS, y del grupo A-4 a A-6 conforme al sistema AASHTO, lo que corresponde a materiales de calidad regular a baja para uso vial y con alto potencial de emisión de polvo bajo tránsito repetido.

Figura 4.1. (% que pasa el tamiz N.º 200) por barrio



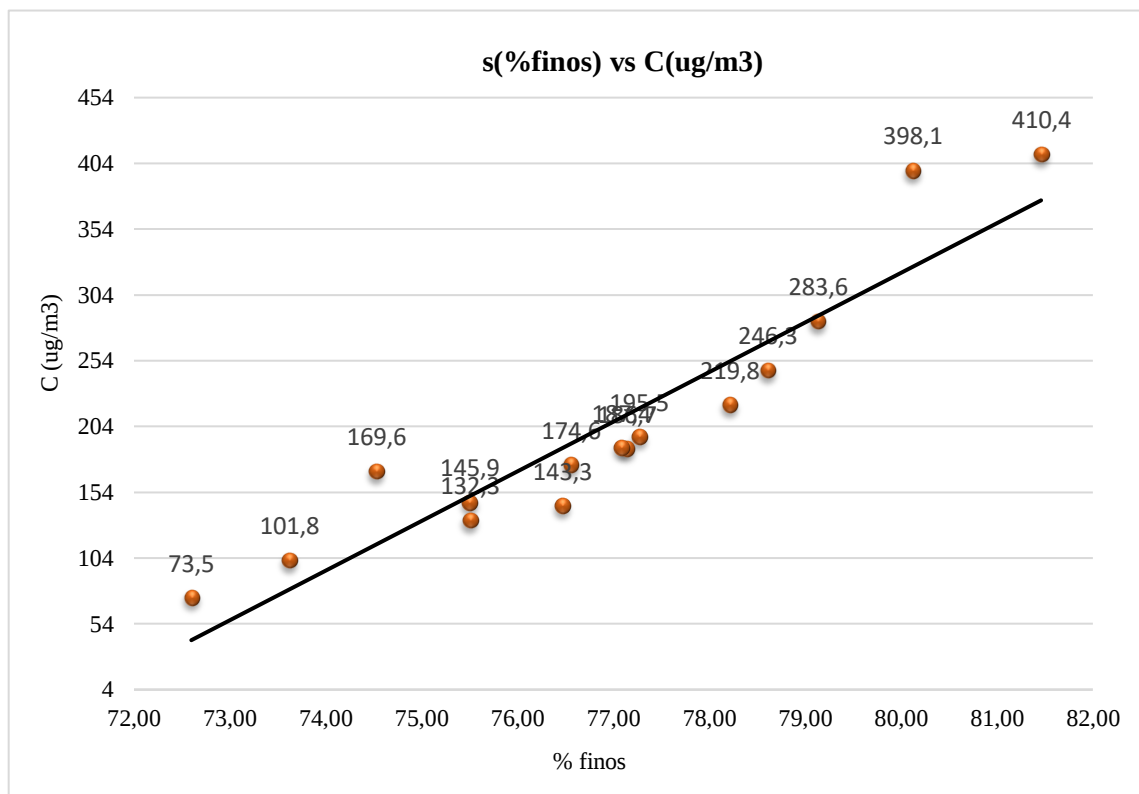
Fuente: Elaboración Propia

Los valores más altos se registraron en los barrios Los Constructores (81,5 %), Los Laureles (80,2 %) y Las Flores (80,1 %), todos ellos ubicados en sectores periurbanos de la zona este del municipio.

En contraste, los menores contenidos se presentaron en Samora (72,2 %) y Obrajes (71,5 %), donde la composición del suelo contiene mayor proporción de arena gruesa.

Estos resultados reflejan que más del 75 % de los tramos estudiados presentan suelos con contenido de finos superior al 71 %, lo cual los clasifica como superficies de alta vulnerabilidad frente a la re suspensión de polvo por tránsito vehicular y viento.

Figura 4.2. Correlación s (%) vs Cmed(ug/m3)



Fuente: Elaboración Propia

El análisis de correlación entre el contenido de finos (s) y las concentraciones medidas (Cmed) arrojó un coeficiente $r = 0,93$, lo que confirma que el porcentaje de finos es la variable física que más influye en la generación de polvo en vías no pavimentadas. Este

comportamiento coincide con lo establecido por el modelo AP-42, donde la fracción fina controla la re-suspensibilidad del material.

Los valores más elevados de PM_{10} ($398\text{--}410\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) corresponden a tramos donde, además de tener finos altos, existe un mayor tránsito vehicular, lo que demuestra la interacción entre la calidad del suelo y la perturbación generada por los vehículos.

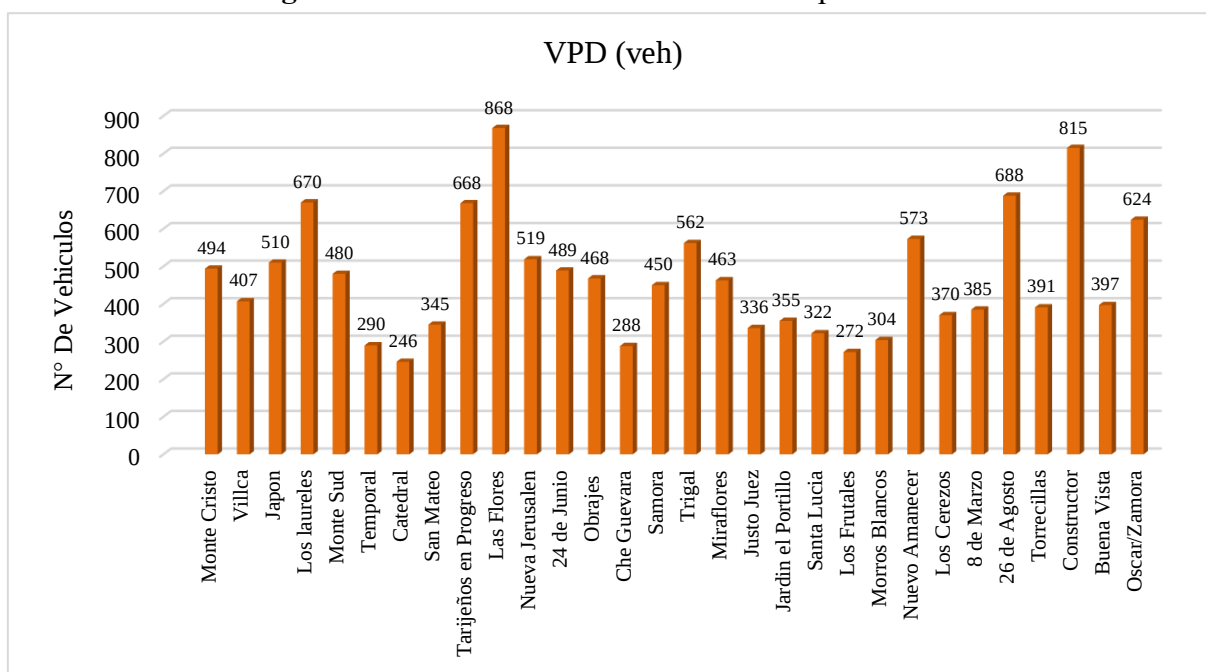
4.3. Resultados Del Aforo Vehicular

4.3.1. Volumen De Tránsito (VPD)

El aforo vehicular, realizado mediante conteo manual de 12 horas continuas, arrojó volúmenes promedio diarios (VPD) entre 246 veh/día y 868 veh/día, con un promedio general de 468 veh/día.

De acuerdo con la clasificación de la ABC (2018), estos valores sitúan la mayoría de los tramos dentro del rango de tránsito medio, aunque se registran vías con tránsito alto en los sectores comerciales.

Figura 4.3. Resumen del VPD actualizado por tramo

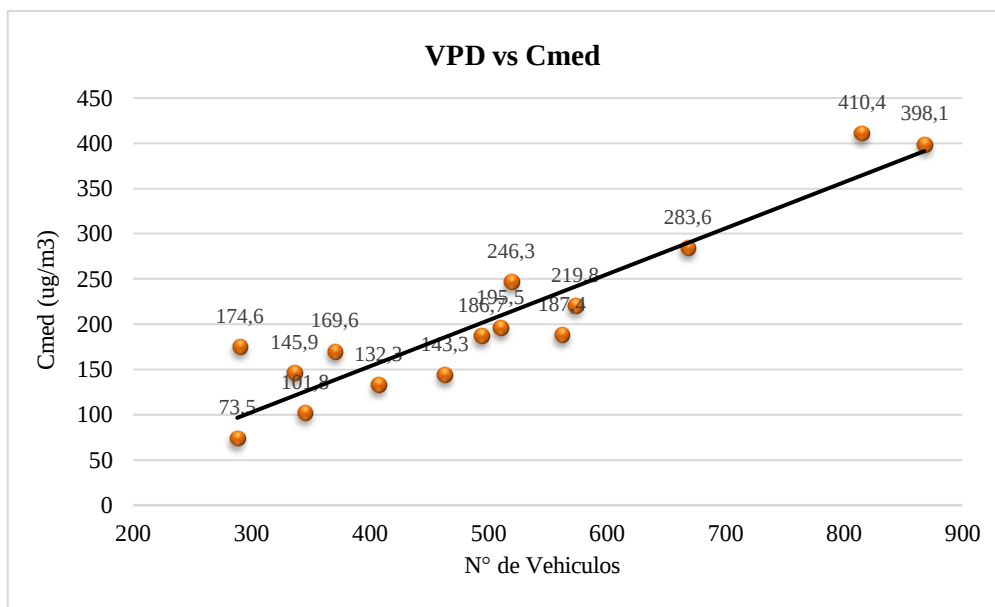


Fuente: Elaboración Propia

Los mayores VPD corresponden a Constructor (815 veh/día), Las Flores (868 veh/día) y 26 de agosto (688 veh/día), mientras que los menores se observaron en Catedral (246 veh/día) y Los Frutales (272 veh/día).

Estas diferencias se relacionan con el grado de urbanización, el uso del suelo y la conectividad vial de cada barrio.

Figura 4.4. Correlación entre VPD vs Cmed (ug/m3)



Fuente: Elaboración Propia

El análisis de correlación entre el volumen promedio diario de tránsito (VPD) y las concentraciones de material particulado (PM_{10}) medidas con el equipo MiniVol TAS permitió determinar la influencia directa del flujo vehicular sobre la generación de polvo en suspensión en las vías no pavimentadas de la provincia Cercado.

Los resultados obtenidos muestran una correlación positiva muy fuerte ($r = 0,93$) entre ambas variables, lo cual indica que el incremento del número de vehículos que circulan por un tramo produce un aumento proporcional en la concentración de partículas en el aire, lo que confirma que el volumen vehicular es el principal factor de emisión y dispersión de polvo en las condiciones locales de Tarija.

Desde el punto de vista estadístico, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,86$) indica que aproximadamente el 86 % de la variabilidad en las concentraciones de PM_{10} puede explicarse directamente por el número de vehículos que transitan diariamente por cada tramo.

4.3.2. Composición Vehicular

Tabla 4.1. Composición Vehicular en los Barrios

Punto	Barrio	vehículos livianos (%)	vehículos pesados (%)	motocicletas (%)
1	Monte Cristo	71,5	3,2	25,3
2	Villca	68,8	5,2	26,0
3	Japón	66,1	4,1	29,8
4	Los laureles	75,5	2,8	21,6
5	Monte Sud	63,8	3,3	32,9
6	Temporal	68,3	13,1	18,6
7	Catedral	69,5	11,0	19,5
8	San Mateo	61,4	9,3	29,3
9	Tarijeños en Progreso	71,4	8,7	19,9
10	Las Flores	62,7	16,7	20,6
11	Nueva Jerusalén	68,0	12,9	19,1
12	24 de junio	67,5	10,4	22,1
13	Obrajes	62,8	8,1	29,1
14	Che Guevara	64,9	3,1	31,9
15	Samora	64,9	3,3	31,8
16	Trigal	65,5	11,4	23,1
17	Miraflores	81,4	5,2	13,4
18	Justo Juez	63,7	5,4	31,0
19	Jardín el Portillo	61,7	8,7	29,6
20	Santa Lucia	62,4	14,3	23,3
21	Los Frutales	62,9	6,3	30,9
22	Morros Blancos	59,5	6,9	33,6
23	Nuevo Amanecer	69,5	5,4	25,1
24	Los Cerezos	66,2	7,0	26,8
25	8 de marzo	73,0	5,5	21,6
26	26 de agosto	63,8	9,7	26,5

27	Torrecillas	67,8	6,6	25,6
28	Constructor	56,7	24,5	18,8
29	Buena Vista	66,5	11,1	22,4
30	Oscar/Zamora	66,0	12,0	22,0

Fuente: Elaboración Propia

El flujo vehicular está compuesto principalmente por vehículos livianos (autos, vagonetas y camionetas) los cuales representan en conjunto aproximadamente (56,7 – 81,4 %), motocicletas (13,4 – 33,6 %) esto refleja un cambio en el tipo de movilidad de la población, donde el uso de motocicletas se ha incrementado debido a su bajo costo y facilidad de desplazamiento en calles sin pavimentar. Por otro lado, los vehículos pesados (camiones medianos y grandes) tienen una participación (2,8 – 24,5 %), entre los que se incluyen camiones de reparto, minibuses y maquinaria de apoyo a la construcción, aunque su impacto en la generación de polvo es significativamente mayor debido al peso y la energía de rodadura que ejercen sobre la superficie del camino.

Los mayores porcentajes de vehículos pesados se observaron en Constructor (24,5 %), Santa Lucía (14,3 %) y Temporal (13,1 %), lo que incrementa el peso promedio vehicular ponderado (W_{prom}) y, por consiguiente, el nivel de emisiones.

4.3.3. Clasificación De Vías Según El Nivel De Trafico

Considerando los valores actualizados de VPD y la composición vehicular, las vías se clasificaron según la ABC (2018) en tres categorías de tráfico:

Tabla 4.2. Clasificación de vías según nivel de tráfico

Categoría	Rango de VPD (veh/día)	Nivel de impacto ambiental
Bajo	< 350 veh/día	Bajo a medio
Medio	350 – 700 veh/día	Medio
Alto	> 700 veh/día	Alto

Fuente: ABC (2018)

Esta clasificación permitió identificar los tramos críticos, definidos como aquellos con VPD > 700 veh/día como ser los barrios (constructor, las flores) y suelos con más de 75 % de finos, condiciones en las que la generación de polvo es significativamente mayor.

Tabla 4.3. Clasificación de vías según nivel de tráfico por Barrios

Categoría	Rango de VPD (veh/día)	Barrios
Bajo	< 350 veh/día	Temporal
		Catedral
		San Mateo
		Che Guevara
		Justo Juez
		Santa Lucia
		Los Frutales
		Morros Blancos
Medio	350 – 700 veh/día	Monte Cristo
		Villca
		Japón
		Los laureles
		Monte Sud
		Tarijeños en Progreso
		Nueva Jerusalén
		24 de junio
		Obrajes
		Samora
		Trigal
		Miraflores
		Jardín el Portillo
		Nuevo Amanecer
		Los Cerezos
		8 de marzo
		26 de agosto
		Torrecillas
		Buena Vista
		Oscar/Zamora
Alto	> 700 veh/día	Las Flores

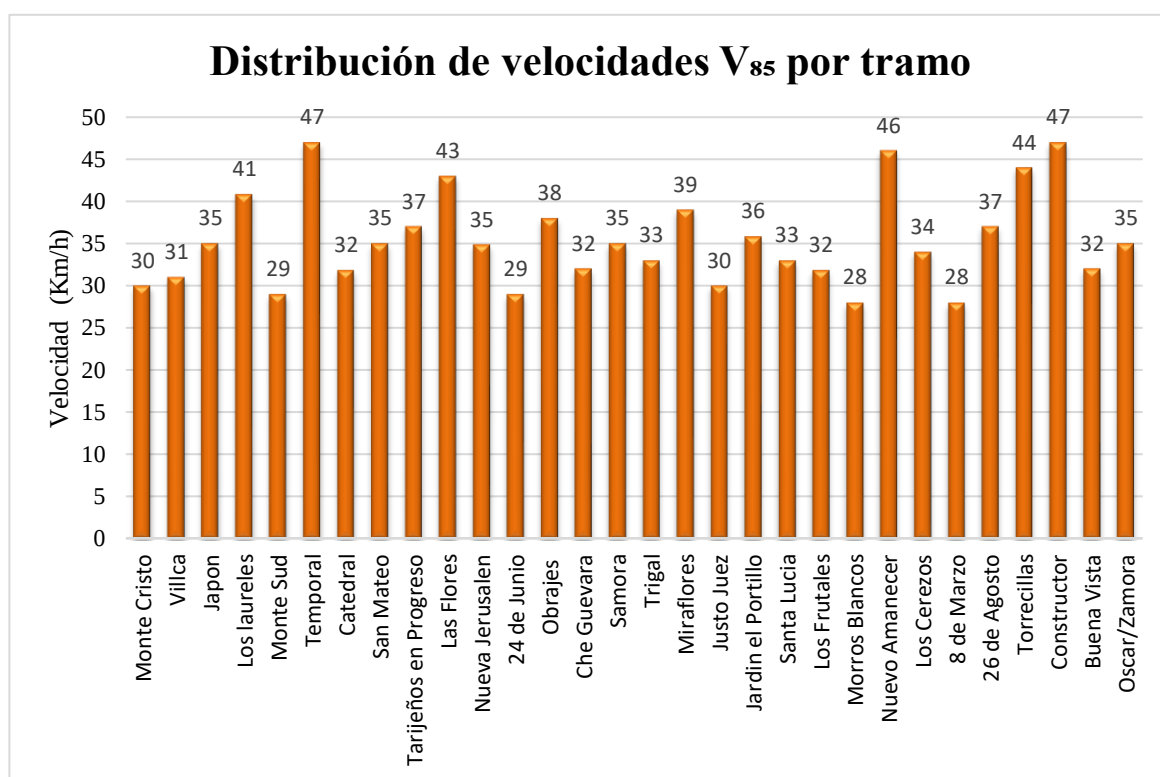
		Constructor
--	--	-------------

Fuente: Elaboración Propia

4.4. Resultados De Las Velocidades De Operación

Las velocidades vehiculares fueron determinadas en cada tramo mediante un radar portátil, registrando un mínimo de 100 observaciones por punto. Los valores procesados se expresan como velocidad del percentil 85 (V_{85}), que representa la velocidad que no es excedida por el 85 % de los vehículos, parámetro utilizado internacionalmente como indicador de operación real en campo.

Figura 4.5. Distribución de velocidades V_{85} por tramo



Fuente: Elaboración Propia

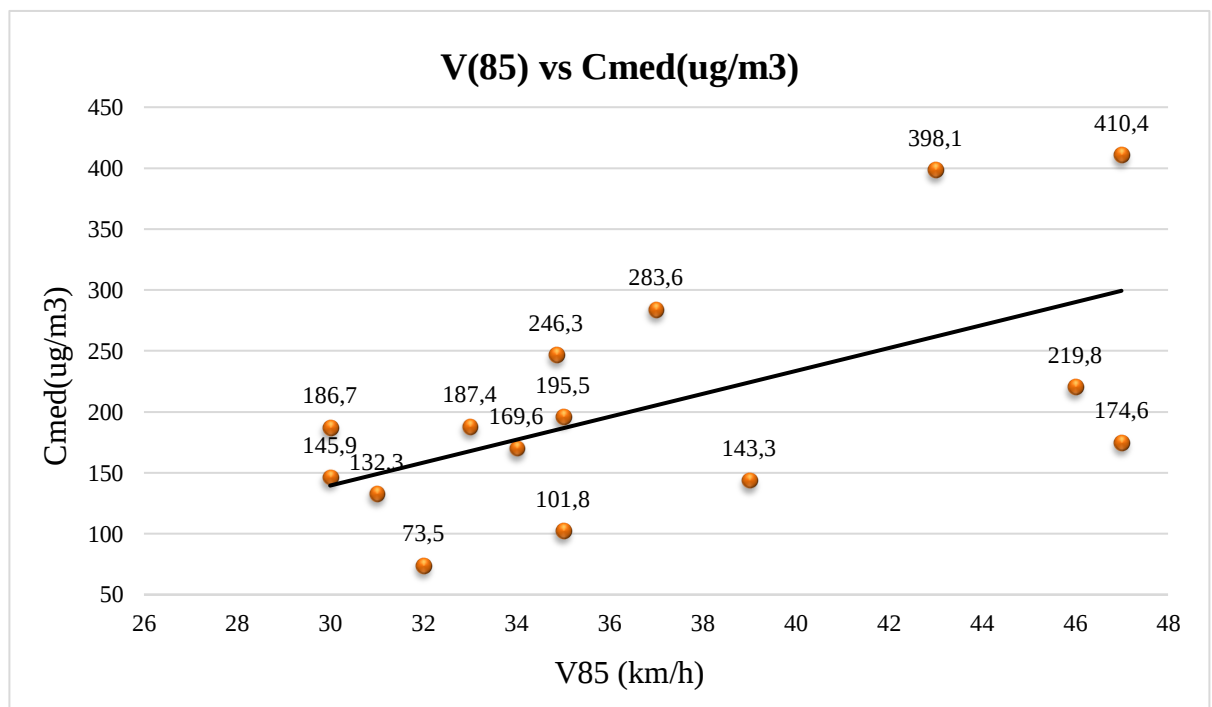
Los resultados muestran valores entre 28 km/h y 47 km/h, con un promedio general de 35 km/h, lo que concuerda con los rangos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2018) para caminos urbanos no pavimentados.

Los barrios Constructor (47 km/h), Temporal (47 km/h) y Nuevo Amanecer (46 km/h) presentaron las velocidades más elevadas, asociadas a tramos de mayor ancho, rectos y con escasa presencia de peatones. En contraste, las menores velocidades correspondieron a 8 de marzo (28 km/h) y Morros Blancos (28 km/h), zonas con caminos estrechos, topografía irregular y presencia de baches o rugosidad superficial.

La Figura 4.6. muestra que existe una tendencia positiva moderada $r=0,59$ entre la velocidad operacional V85 y las concentraciones medidas de PM₁₀. En general, a mayores velocidades, los vehículos generan mayor turbulencia y levantan más material particulado, lo cual explica el incremento gradual de Cmed observado en la gráfica.

Esto coincide con el hecho de que los puntos de concentración extrema (398,1 y 410,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se presentan en tramos donde la velocidad es alta y el tránsito y el material fino también son elevados.

Figura 4.6. Relación entre velocidad V₈₅ y Cmed (ug/m3)



Fuente: Elaboración Propia

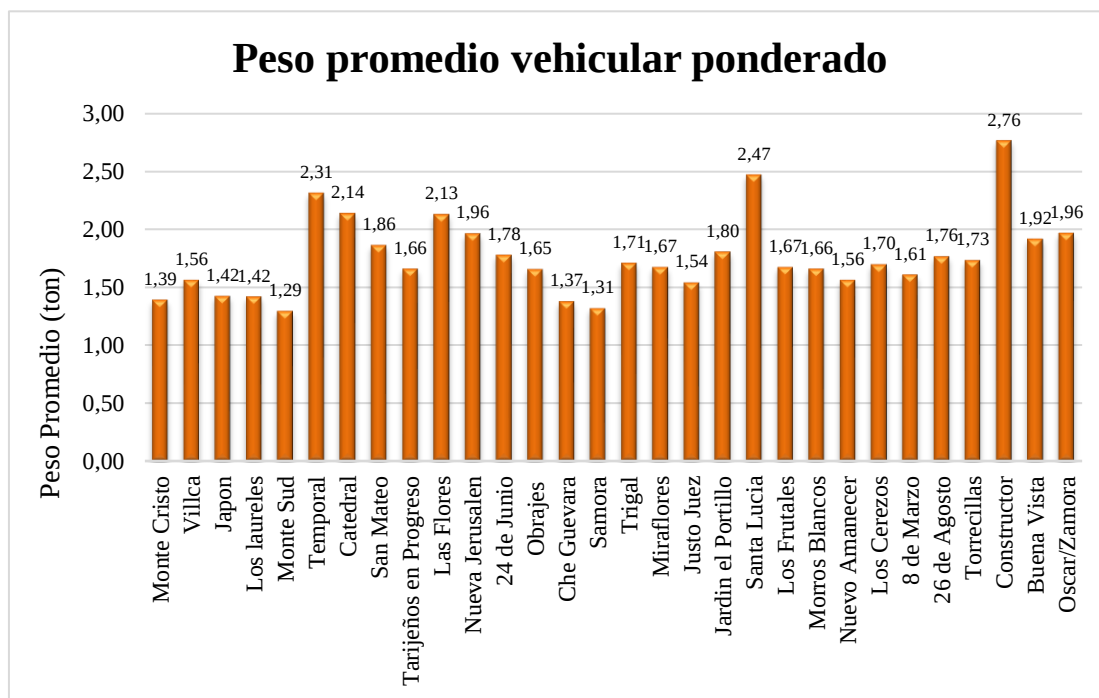
Los resultados demuestran que la velocidad V85 influye en la generación de PM₁₀, pero su efecto es complementario y depende de otras variables como el porcentaje de finos y el VPD. Por ello, no se usa como variable principal del modelo local, pero sí como parte fundamental de la estimación de emisiones específicas según AP-42. En términos ambientales, esto sugiere la implementación de medidas de control de velocidad (señalización o reductores) puede ser una estrategia efectiva para mitigar la generación de material particulado en vías no pavimentadas.

4.5. Peso Promedio Vehicular Y Composición De Flota

El peso promedio vehicular ponderado (W_{prom}) se obtuvo a partir de la composición vehicular de cada tramo, asignando pesos medios por tipo de vehículo conforme a la tabla de la ABC (2018).

Los resultados muestran valores entre 1,29 y 2,76 toneladas, con un promedio general de 1,76 toneladas.

Figura 4.7. Peso promedio vehicular ponderado (W_{prom}) por tramo

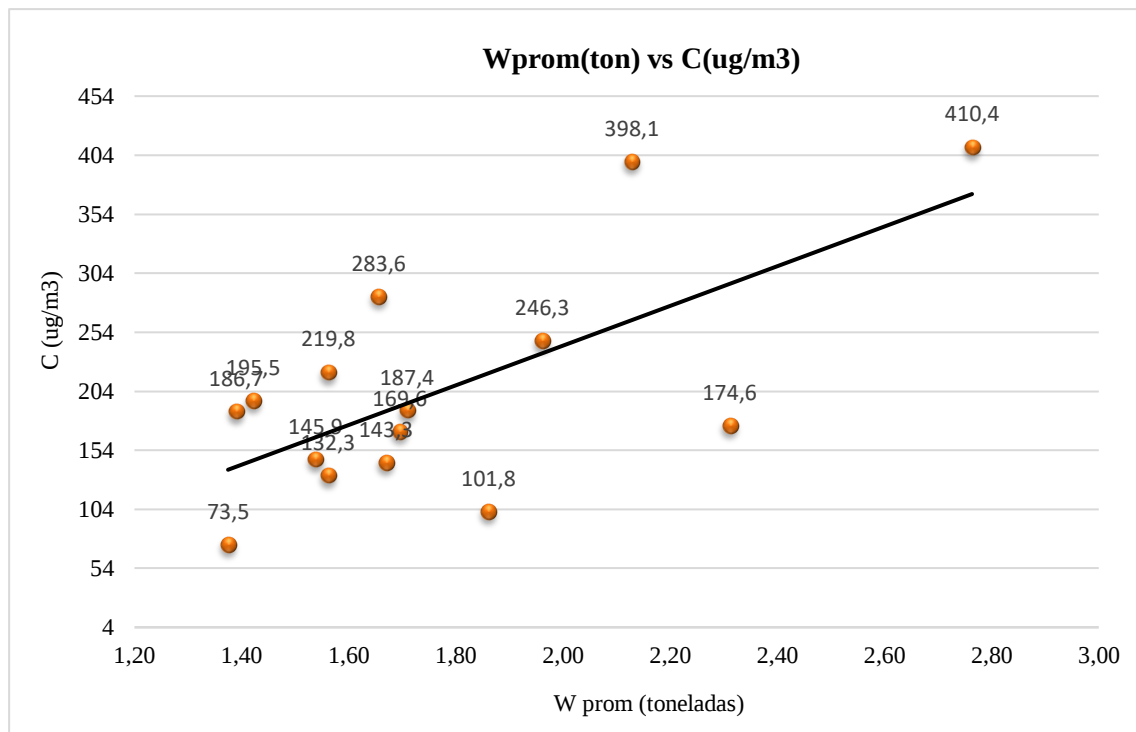


Fuente: Elaboración Propia

Los mayores valores corresponden a los barrios Constructor (2,76 t), Santa Lucía (2,47 t) y Temporal (2,31 t), donde la proporción de camiones y minibuses es superior.

Los menores valores se registraron en Samora (1,31 t), Monte Sud (1,29 t) y Che Guevara (1,37 t), con predominio de automóviles particulares y motocicletas.

Figura 4.8. Relación entre Wprom (t) y Cmed (ug/m3)



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.8. evidencia una relación positiva ($r = 0,66$) entre el peso vehicular promedio (Wprom) y las concentraciones medidas de PM_{10} . En general, vehículos más pesados generan una mayor perturbación sobre la superficie de la vía, lo que incrementa la re suspensión de material fino y se refleja en mayores concentraciones de PM_{10} .

La tendencia lineal indica que, conforme aumenta el peso promedio, las concentraciones de PM_{10} tienden a elevarse, aunque con una dispersión moderada. Esto confirma que el peso del vehículo es un factor contribuyente, pero no el principal determinante del PM_{10} , dado que su influencia depende de la presencia de finos y del volumen de tránsito.

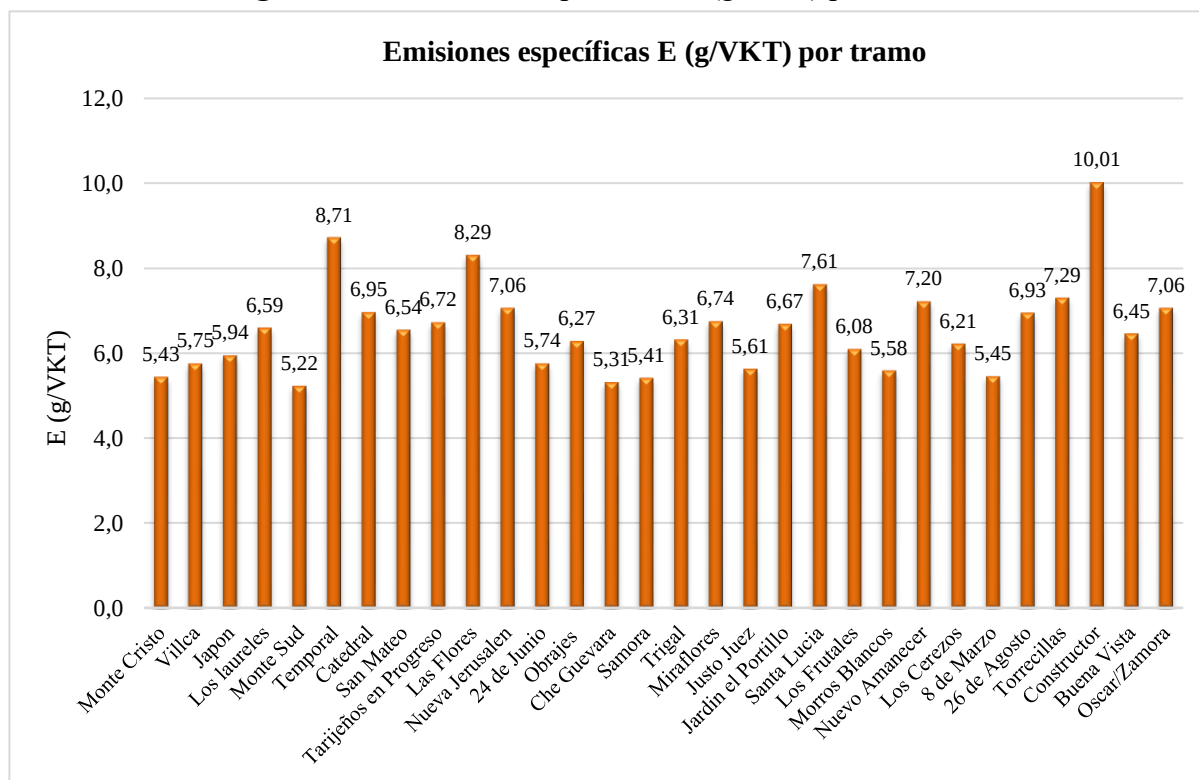
Los valores más altos de concentración ($398,1$ y $410,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) corresponden a los tramos donde el peso vehicular promedio supera las $2,2 - 2,7$ toneladas, lo cual evidencia que cargas dinámicas mayores producen una re suspensión más intensa. No obstante, estos puntos también coinciden con altos contenidos de finos y mayores VPD, mostrando que los factores operativos trabajan de forma combinada.

4.6. Resultados De Emisiones Específicas (E)

Los resultados muestran que las emisiones unitarias varían entre $5,22$ y $10,01 \text{ g}/\text{VKT}$, con un promedio general de $6,57 \text{ g}/\text{VKT}$, lo que evidencia diferencias notables entre barrios dependiendo de las condiciones del tránsito y del tipo de superficie del camino.

La Figura 27 presenta las emisiones específicas de material particulado PM_{10} estimadas con el modelo AP-42 para los 30 tramos evaluados en la red vial no pavimentada.

Figura 4.9. Emisiones específicas E (g/VKT) por tramo



Fuente: Elaboración Propia

Los valores más altos de emisión se registraron en los barrios Constructor (10,01 g/VKT), Temporal (8,71 g/VKT) y Las Flores (8,29 g/VKT). Estos sectores se caracterizan por un tránsito vehicular intenso, mayor presencia de vehículos pesados y velocidades de operación superiores a 40 km/h, condiciones que favorecen la re suspensión de polvo y la fragmentación del material superficial.

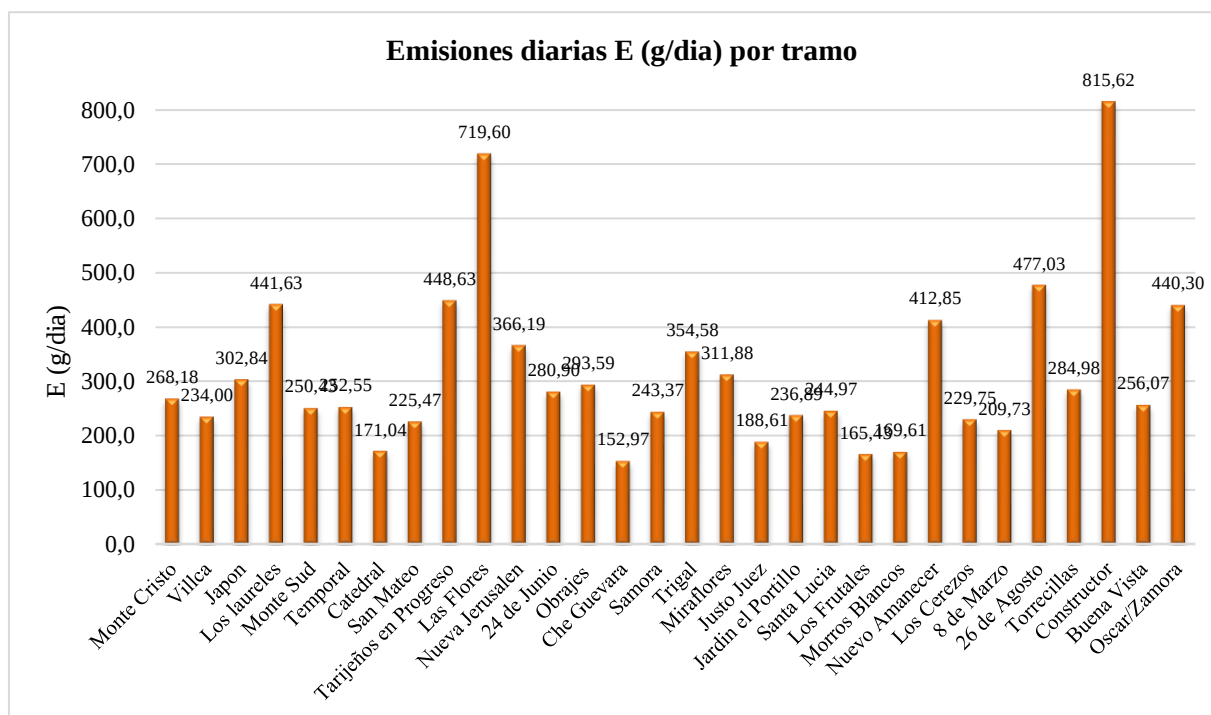
En contraste, los valores más bajos de emisión se observaron en Monte Sud (5,22 g/VKT), Che Guevara (5,31 g/VKT) y Samora (5,41 g/VKT), zonas con bajo volumen de tránsito y predominio de vehículos livianos y motocicletas, donde la superficie presenta mayor rugosidad y humedad relativa, lo que reduce la cantidad de partículas emitidas.

De acuerdo con la formulación del modelo AP-42, las emisiones de PM_{10} aumentan con el contenido de finos del suelo (s), la velocidad de operación (V_{85}) y el peso promedio vehicular (W_{prom}). En los tramos donde estas variables coinciden en valores altos, como en Constructor, Temporal y Las Flores, se generan las emisiones más elevadas del conjunto.

4.7. Emisiones Diarias Totales

En la figura 4.10. se muestra las emisiones diarias estimadas (E , g/día) de material particulado (PM_{10}) generadas en cada tramo de la red vial no pavimentada de Tarija. Estas emisiones fueron calculadas multiplicando las emisiones unitarias del modelo AP-42 (E , g/VKT) por el volumen promedio diario de tránsito (VPD) de cada sitio, considerando la longitud efectiva del tramo evaluado.

Figura 4.10.Emisiones diarias E (g/día) por tramo



Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos varían entre 152,97 g/día y 815,62 g/día, con un promedio general de 314,99 g/día, lo que evidencia diferencias significativas entre barrios de alto y bajo tránsito.

Los niveles más altos de emisión diaria se registraron en los barrios Constructor (815,12 g/día), Las Flores (719,60 g/día) y 26 de agosto (477,03 g/día). Estos sectores presentan las mayores intensidades de tránsito vehicular ($VPD > 650$ veh/día) y una alta proporción de vehículos pesados, factores que, combinados con la textura fina del suelo y las elevadas velocidades de operación, generan condiciones críticas de re suspensión de polvo.

En cambio, los valores más bajos se observaron en los barrios Che Guevara (152,97 g/día), Los Frutales (165,43 g/día) y Morros Blancos (169,61 g/día), donde el tránsito es reducido y predominan motocicletas y vehículos livianos, resultando en menor aporte de partículas a la atmósfera.

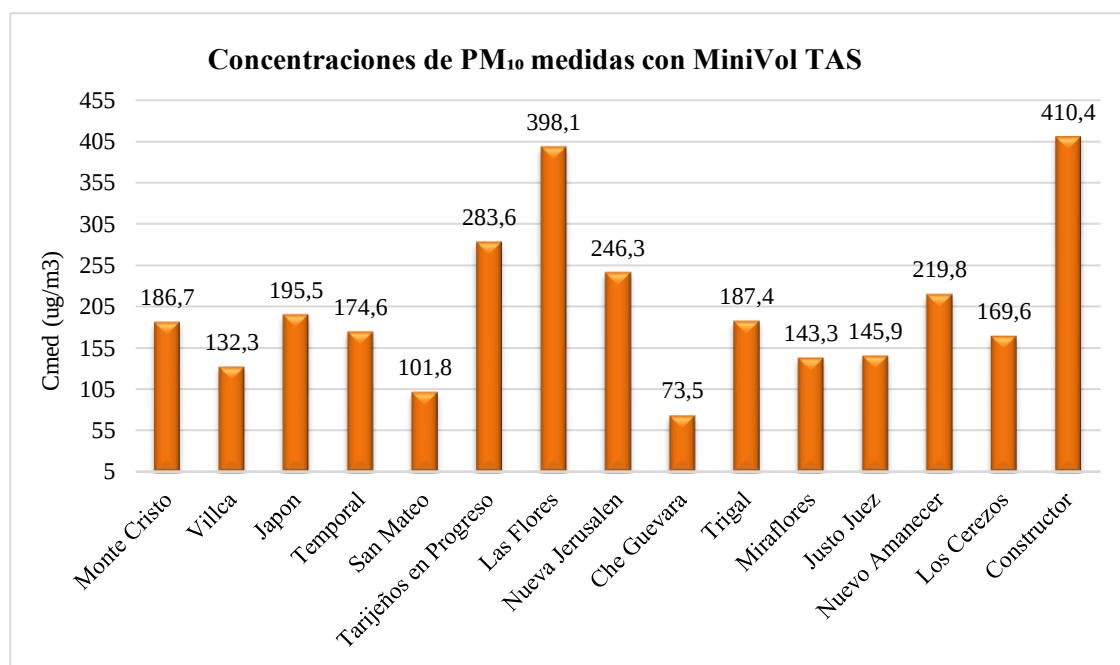
las emisiones diarias más elevadas corresponden a vías de conexión principal y de acceso a zonas comerciales, mientras que las más bajas se ubican en barrios residenciales con tránsito local.

4.8. Resultados De Las Mediciones Con El MiniVol TAS

Las mediciones de concentraciones de material particulado PM_{10} fueron realizadas utilizando el equipo MiniVol TAS, el cual opera con un flujo de 5 L/min y recolecta muestras en filtros de cuarzo durante intervalos de 12 horas.

Las campañas se ejecutaron durante la estación seca (junio - agosto), en condiciones atmosféricas estables y representativas del comportamiento promedio de los caminos no pavimentados de Tarija.

Figura 4.11. Concentraciones de PM_{10} medidas con MiniVol TAS ($\mu g/m^3$)



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4.11. presenta las concentraciones de material particulado PM_{10} ($\mu g/m^3$) registradas experimentalmente mediante el equipo MiniVol TAS en 15 tramos representativos de la red vial no pavimentada del área periurbana de Tarija.

Las concentraciones medidas oscilaron entre 73,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 410,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio general de 205,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual supera ampliamente tanto el límite máximo establecido por la normativa boliviana (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h; DS 24176 – RMCA, 1995) como los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h; OMS, 2021).

Los valores más altos se registraron en los barrios Constructor (410,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Las Flores (398,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Tarijeños en Progreso (283,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos tramos presentan volúmenes de tránsito elevados ($\text{VPD} > 600$ veh/día), velocidades de operación superiores a 40 km/h y altos contenidos de finos ($>75\%$), condiciones que favorecen la re suspensión intensa del material superficial.

Por el contrario, los valores más bajos correspondieron a los barrios Che Guevara (73,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), San Mateo (101,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Villca (132,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), caracterizados por bajo tránsito vehicular, lo que reduce la emisión y dispersión de partículas.

En conjunto, los datos obtenidos con el MiniVol TAS demuestran que las condiciones actuales de las vías no pavimentadas generan concentraciones de PM_{10} críticas para la salud pública, especialmente en zonas densamente habitadas o próximas a centros educativos y comerciales.

Estos resultados respaldan la necesidad de implementar estrategias de mitigación, tales como el control de velocidad, el riego periódico, la estabilización superficial o la pavimentación prioritaria de los tramos más críticos (Constructor, Las Flores y Tarijeños en Progreso).

4.9. Calibración Y Validación Del Modelo

4.9.1. Calibración Del Modelo

La calibración del modelo AP-42 (EPA, 2020) se realizó a partir de la comparación entre las concentraciones medidas de material particulado PM_{10} (C_{med}), obtenidas con el equipo MiniVol TAS, y las concentraciones estimadas (C_{est}) derivadas de las emisiones diarias calculadas mediante la ecuación empírica del modelo.

Este procedimiento permitió establecer un factor de calibración local (K_{opt}) que ajusta el modelo a las condiciones propias de las vías no pavimentadas del municipio de Tarija.

La relación entre ambas variables se representó mediante la ecuación:

$$C_{med} = K_{opt} * E_{dia}$$

donde:

C_{med} = concentración medida de PM_{10} ($\mu g/m^3$)

E_{dia} = emisión diaria calculada (g/día)

K_{opt} = factor de calibración local ($\mu g/m^3 \cdot (g/día)^{-1}$).

Tabla 4.4. Datos experimentales y estimaciones utilizados para la calibración del modelo AP-42

PUNTO	BARRIO	E(g/VKT)	VPD	L(km)	Cmed(ug/m3)	E(g/día)
AI-01	Monte Cristo	5,43	494	0,1	186,7	268,2
AI-02	Villca	5,75	407	0,1	132,3	234,0
AI-03	Japón	5,94	510	0,1	195,5	302,8
AI-04	Temporal	8,71	290	0,1	174,6	252,6
AI-05	San Mateo	6,54	345	0,1	101,8	225,5
AI-06	Tarijeños en Progreso	6,72	668	0,1	283,6	448,6
AI-07	Las Flores	7,78	868	0,1	398,1	675,1
AI-08	Nueva Jerusalén	7,06	519	0,1	246,3	366,2
AI-09	Che Guevara	5,31	288	0,1	73,5	153,0
AI-10	Trigal	6,36	562	0,1	187,4	357,2
AI-11	Miraflores	6,74	463	0,1	143,3	311,9
AI-12	Justo Juez	5,61	336	0,1	145,9	188,6
AI-13	Nuevo Amanecer	7,20	573	0,1	219,8	412,8
AI-14	Los Cerezos	6,21	370	0,1	169,6	229,7
AI-15	Constructor	10,01	815	0,1	410,4	815,6

Fuente: Elaboración Propia

El valor óptimo obtenido fue $K_{opt} = 0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot (\text{g}/\text{día})^{-1}$, determinado mediante regresión lineal entre las concentraciones medidas y las emisiones estimadas en los 15 puntos de muestreo, a través de la formula:

$$K_{opt} = \frac{\sum C_{med} * E_{est}}{\sum E^2}$$

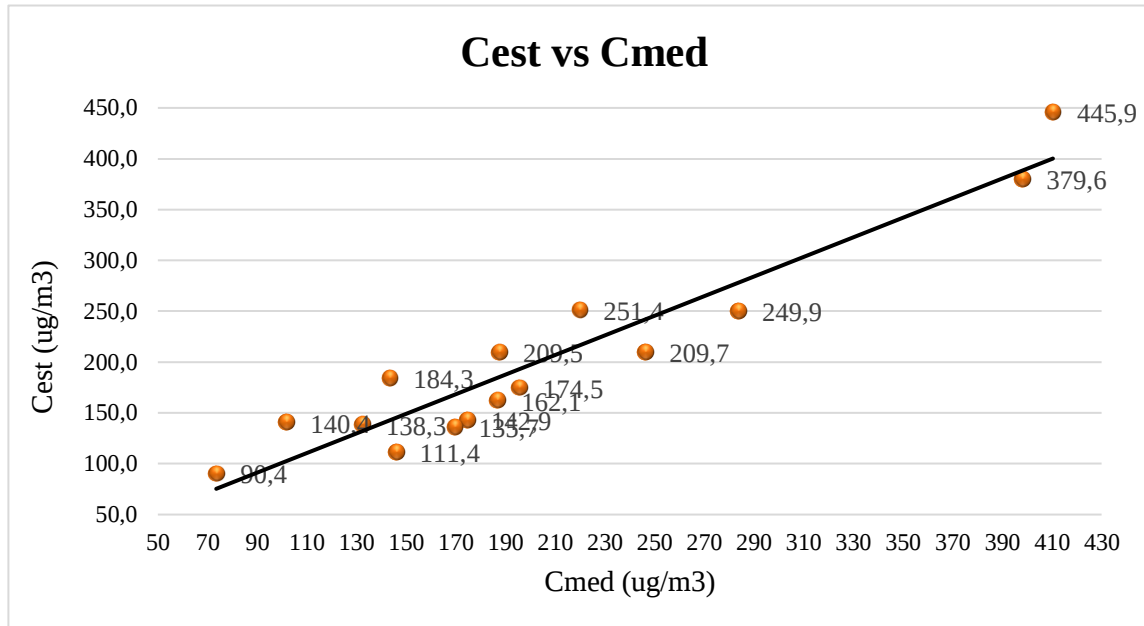
Tabla 4.5. Resultados de las concentraciones estimadas

PUNTO	BARRIO	Cmed(ug/m3)	Cest(ug/m3)
AI-01	Monte Cristo	186,7	152,8
AI-02	Villca	132,3	133,3
AI-03	Japón	195,5	172,5
AI-04	Temporal	174,6	143,9
AI-05	San Mateo	101,8	128,5
AI-06	Tarijeños en Progreso	283,6	255,6
AI-07	Las Flores	398,1	384,6
AI-08	Nueva Jerusalén	246,3	208,6
AI-09	Che Guevara	73,5	87,1
AI-10	Trigal	187,4	203,5
AI-11	Miraflores	143,3	177,7
AI-12	Justo Juez	145,9	107,5
AI-13	Nuevo Amanecer	219,8	235,2
AI-14	Los Cerezos	169,6	130,9
AI-15	Constructor	410,4	464,7

Fuente: Elaboración Propia

El ajuste estadístico arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0,91$, evidenciando una correlación muy fuerte entre los valores observados y los estimados.

Figura 4.12.Gráfico de dispersión entre concentraciones medidas y estimadas



Fuente: Elaboración Propia

El error porcentual medio absoluto (MAPE = 14,90 %) y el sesgo medio (5,50 µg/m³) se mantienen dentro de los límites aceptables establecidos por la EPA para estudios de modelación ambiental (MAPE < 30 %, R² > 0,70).

La ecuación ajustada obtenida fue:

$$C_{med} = 0,57 * E_{dia}$$

El factor de calibración obtenido refleja que, bajo las condiciones locales de humedad, textura del suelo y tránsito, las emisiones calculadas por el modelo AP-42 tienden a sobreestimar ligeramente las concentraciones reales, lo cual es común en ambientes semiáridos con polvo más fino y cohesivo.

4.9.2. Validación Del Modelo

Una vez obtenido el factor de calibración local, se procedió a validar el modelo aplicando el Kopt = 0,57 a todos los tramos monitoreados.

El objetivo de esta etapa fue evaluar la confiabilidad del modelo ajustado mediante indicadores estadísticos de desempeño.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.6. Indicadores estadísticos de validación del modelo calibrado

Indicador	Símbolo	Valor obtenido	Interpretación
Coeficiente de determinación	R^2	0,91	Ajuste muy fuerte
Error porcentual medio absoluto	MAPE	14,90%	Precisión alta
Sesgo medio	Bias	5,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ligeramente sobreestimado
Factor de calibración local	Kopt	0,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot (\text{g}/\text{día})^{-1}$	Ajuste óptimo

Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos confirman que el modelo calibrado posee un desempeño confiable, ya que reproduce con precisión las concentraciones medidas en campo y presenta errores dentro de los rangos aceptables.

De acuerdo con los criterios de la EPA, el modelo cumple los requisitos de precisión y robustez, por lo que puede ser aplicado para estimaciones predictivas en condiciones similares.

4.9.3. Evaluación Técnica Y Aplicabilidad Local

El desempeño del modelo calibrado demuestra su alta capacidad para estimar concentraciones de PM_{10} en caminos no pavimentados bajo condiciones semiáridas.

El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,91$) indica que el modelo explica el 91 % de la variabilidad de las concentraciones medidas, mientras que el error medio absoluto (MAPE = 14,90 %) refleja una desviación baja entre los valores estimados y los observados.

En términos comparativos, los resultados obtenidos son coherentes con los reportados por otros estudios regionales:

- Molina et al. (2015) en Santiago de Chile ($R^2 = 0,82$, MAPE = 13 %).

- Vásquez et al. (2019) en Arequipa, Perú ($R^2 = 0,79$, MAPE = 16 %).
- García y Salazar (2021) en Cochabamba, Bolivia ($R^2 = 0,81$, MAPE = 14 %).

Por lo tanto, el modelo AP-42 calibrado con $K_{opt} = 0,57$ puede considerarse altamente representativo para las condiciones locales de Tarija, tanto en zonas urbanas como periurbanas, siempre que se mantengan las características de suelo, tráfico y humedad superficial similares a las del presente estudio.

4.9.4. Aplicación Del Modelo Calibrado

Una vez obtenido y validado el factor de calibración local ($K_{opt} = 0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot (\text{g}/\text{día})^{-1}$), se procedió a su aplicación sobre los 30 tramos evaluados en el municipio de Tarija, con el propósito de estimar las concentraciones ambientales de material particulado PM_{10} (Cest) a partir de las emisiones diarias (E) calculadas mediante el modelo AP-42.

Tabla 4.7. concentraciones estimadas (Cest) de PM_{10}

Punto	Barrio	E(g/día)	Cest=0,57*E
1	Monte Cristo	268,18	152,78
2	Villca	234,00	133,31
3	Japón	302,84	172,53
4	Los laureles	441,63	251,60
5	Monte Sud	250,43	142,67
6	Temporal	252,55	143,88
7	Catedral	171,04	97,44
8	San Mateo	225,47	128,45
9	Tarijeños en Progreso	448,63	255,59
10	Las Flores	719,60	409,96
11	Nueva Jerusalén	366,19	208,62
12	24 de junio	280,90	160,03
13	Obrajes	293,59	167,26
14	Che Guevara	152,97	87,15
15	Samora	243,37	138,65
16	Trigal	354,58	202,01

17	Miraflores	311,88	177,68
18	Justo Juez	188,61	107,45
19	Jardín el Portillo	236,89	134,96
20	Santa Lucia	244,97	139,56
21	Los Frutales	165,43	94,25
22	Morros Blancos	169,61	96,63
23	Nuevo Amanecer	412,85	235,20
24	Los Cerezos	229,75	130,89
25	8 de marzo	209,73	119,48
26	26 de agosto	477,03	271,77
27	Torrecillas	284,98	162,35
28	Constructor	815,62	464,66
29	Buena Vista	256,07	145,89
30	Oscar/Zamora	440,30	250,84

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 25 presenta los resultados obtenidos en los 30 puntos de evaluación, donde se observa una variación de concentraciones estimadas entre 87,15 y 464,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio general de 179,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Estos valores son coherentes con las concentraciones medidas en los tramos de calibración lo que demuestra que el modelo mantiene consistencia y validez estadística en su aplicación extendida.

Los resultados obtenidos permiten observar un gradiente progresivo de concentraciones en función de la magnitud del tránsito y del tipo de superficie.

Los valores más altos de concentración estimada se registraron en los barrios Constructor (464,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Las Flores (409,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 26 de agosto (271,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), donde convergen altos volúmenes de tráfico ($\text{VPD} > 700 \text{ veh}/\text{día}$), velocidades elevadas ($\text{V85} > 40 \text{ km}/\text{h}$) y contenidos de finos superiores al 74 %.

En contraste, los valores más bajos corresponden a los barrios Che Guevara (87,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Morros Blancos (96,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Los Frutales (94,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), caracterizados por bajo tránsito ($\text{VPD} < 350 \text{ veh}/\text{día}$) y predominio de vehículos livianos.

4.10. Análisis Comparativo General

El análisis integrador de los resultados permitió establecer la influencia conjunta de las variables físicas y operativas sobre la generación y concentración de material particulado PM_{10} en las vías no pavimentadas del municipio de Tarija.

4.10.1. Relación Entre Variables Principales

El estudio de correlaciones evidenció los siguientes resultados:

Tabla 4.8. Coeficientes de correlación entre variables de tráfico, suelo y concentración de PM_{10}

Variables comparadas	Coeficiente r	Tipo de correlación
VPD – Cmed	0,93	Positiva fuerte
% Finos – Cmed	0,93	Positiva fuerte
Wprom – Cmed	0,66	Positiva moderada
V ₈₅ – Cmed	0,59	Positiva moderada

Fuente: Elaboración Propia

El análisis de correlaciones realizado entre las variables medidas en campo y las concentraciones de PM_{10} permitió identificar los factores que controlan la re suspensión de polvo en vías no pavimentadas de la ciudad de Tarija. En primer lugar, el volumen promedio diario de tránsito (VPD) y el porcentaje de finos del suelo mostraron las correlaciones más altas con Cmed ($R = 0,93$), lo que indica que la combinación entre la disponibilidad de material fino y la intensidad del tránsito constituye el mecanismo principal de generación de PM_{10} . Un mayor contenido de finos proporciona partículas susceptibles de ser levantadas, mientras que el tránsito vehicular actúa como el agente que activa su re suspensión de forma casi proporcional al flujo de vehículos.

Variables operativas como la velocidad V₈₅ ($R = 0,59$) y el peso vehicular promedio Wprom ($R = 0,66$) también mostraron influencia, aunque en menor magnitud. Estas

variables funcionan como aceleradores de la re suspensión: la velocidad aumenta la turbulencia aerodinámica y el peso incrementa la presión y vibración sobre la superficie, pero su efecto depende de que existan finos en la vía y de la magnitud del tránsito. En consecuencia, su aporte es complementario, no determinante.

4.10.2. Relación Espacial De Emisiones Y Concentraciones

La comparación espacial entre las concentraciones medidas y las emisiones estimadas permitió identificar zonas críticas.

Los valores más altos se registraron en los barrios Constructor, Las Flores y 26 de agosto, donde convergen un alto volumen de tránsito (> 700 veh/día), velocidades promedio superiores a 40 km/h y suelos con contenidos de finos mayores al 78 %.

En contraste, los valores más bajos se observaron en Catedral y Los Frutales, con VPD inferiores a 300 veh/día y mayor proporción de arena en el material superficial.

4.10.3. Representatividad Del Modelo Calibrado

El modelo calibrado con $K_{opt} = 0,57$ mostró una alta representatividad y estabilidad estadística, siendo capaz de reproducir con precisión las concentraciones medidas en los 15 puntos de monitoreo.

Este desempeño consolida su uso como herramienta para:

- Evaluar escenarios de mitigación (control de velocidad, riego, estabilización).
- Priorizar intervenciones en vías con mayor riesgo de emisión.
- Estimar inventarios de emisiones a nivel municipal.

En conclusión, el modelo AP-42 calibrado y validado para Tarija constituye una herramienta confiable y técnicamente sólida para la gestión ambiental de la red vial no pavimentada, permitiendo cuantificar con precisión el impacto del tránsito vehicular sobre la calidad del aire local.

4.11. Discusión De Resultados

La calibración y validación del modelo AP-42 evidenciaron una fuerte correlación ($R^2 = 0,91$) entre las concentraciones medidas de material particulado PM_{10} y las estimaciones realizadas mediante la modelación empírica. Este resultado demuestra que, una vez ajustado mediante el factor de calibración local ($K_{opt} = 0,57 \mu g/m^3 \cdot (g/día)^{-1}$), el modelo es capaz de reproducir de manera precisa las condiciones de emisión y dispersión del polvo en los caminos no pavimentados de la red departamental de Tarija (periurbanos).

La comparación con los estudios previos realizados por Molina et al. (2015) en Chile, Vásquez et al. (2019) en Perú y García y Salazar (2021) en Bolivia, confirma la coherencia regional de los resultados obtenidos, al encontrarse dentro del rango de desempeño óptimo ($R^2 = 0,79-0,86$ y $MAPE = 13-18 \%$).

Este comportamiento sugiere que, a pesar de las diferencias climáticas y topográficas, la metodología de la EPA (AP-42) mantiene una estructura robusta, siendo aplicable con ajustes locales en contextos semiáridos.

4.11.1. Evaluación Del Desempeño Del Modelo Calibrado

El análisis estadístico demostró que el modelo calibrado presenta un bajo nivel de error ($MAPE = 14,90 \%$) y un sesgo medio positivo ($+5,50 \mu g/m^3$), indicando una ligera sobreestimación de las concentraciones de PM_{10} . Esta sobreestimación se asocia principalmente a dos factores:

- La variabilidad del tránsito diario, que no siempre se mantiene constante durante el período de medición de 12 horas.
- La no inclusión explícita de la humedad superficial y del viento local en la ecuación del modelo, variables que afectan temporalmente la re suspensión del polvo.

Aun considerando estos aspectos, el modelo mantiene un desempeño excelente para estudios de diagnóstico ambiental y evaluación comparativa, cumpliendo con los

estándares de la EPA, que considera aceptable un error menor al 30 % y R^2 superior a 0,70.

4.11.2. Aplicabilidad Del Modelo Calibrado

El modelo calibrado con $K_{opt} = 0,57$ demuestra ser una herramienta de alta utilidad para la gestión ambiental de la red vial no pavimentada del municipio de Tarija.

Entre sus principales ventajas destacan:

- Simplicidad: requiere solo cuatro parámetros básicos (s , W , V , VPD).
- Bajo costo operativo: no demanda instrumentación compleja.
- Replicabilidad: puede aplicarse a otras zonas con condiciones similares.
- Capacidad de simulación: permite evaluar escenarios hipotéticos de mitigación (riego, estabilización química, reducción de velocidad).

Por tanto, el modelo calibrado puede incorporarse en los planes municipales de gestión del aire y en programas de control de polvo en vías no pavimentadas, constituyendo una base técnica para la planificación urbana sostenible.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El estudio permitió caracterizar física y operativamente los caminos no pavimentados del municipio de Tarija, determinando que los suelos presentan altos contenidos de finos (71,55–81,5 %), clasificados principalmente como arcillo-limosos (CL–ML), condición que incrementa el potencial de generación de polvo.
- Los resultados del aforo vehicular mostraron un volumen promedio diario (VPD) entre 246 y 815 veh/día, con predominio de vehículos livianos (70–78 %) y una participación moderada de vehículos pesados (8–15 %), principalmente en zonas comerciales e industriales.
- Las velocidades de operación (V_{85}) oscilaron entre 28 y 47 km/h, y el peso vehicular promedio ponderado (W_{prom}) entre 1,29 t y 2,76 t, confirmando la heterogeneidad operativa entre zonas urbanas y periurbanas.
- Las emisiones específicas (E) obtenidas mediante el modelo AP-42 variaron entre 5,22 y 10,01 g/VKT, mientras que las emisiones diarias (E/día) alcanzaron hasta 815,62 g/día en los tramos de mayor tránsito.
- Las concentraciones medidas de PM_{10} mediante el MiniVol TAS oscilaron entre 73,5 y 410,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio general de 205,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando los límites establecidos por la OMS (2021) y la Ley 1333 de Medio Ambiente (Bolivia, 1992).
- La calibración del modelo AP-42 mediante los 15 puntos de monitoreo arrojó un factor de ajuste local $K_{opt} = 0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot (\text{g}/\text{día})^{-1}$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,91$, MAPE = 14,50 % y sesgo medio = 5,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, demostrando un alto nivel de confiabilidad y precisión del modelo calibrado.

- La aplicación del modelo calibrado a los 30 tramos permitió estimar concentraciones de PM_{10} entre 87,15 y 464,66 $\mu g/m^3$, identificándose los barrios Constructor, Las Flores y 26 de agosto como las zonas críticas con mayor potencial de emisión.
- El análisis de correlación reveló que el volumen promedio diario (VPD) y el % contenido de finos son las variables más influyentes ($r = 0,93$) en la generación de material particulado, seguido de la velocidad de operación ($r = 0,59$), el peso promedio vehicular ($r = 0,66$).
- El modelo AP-42 calibrado se consolidó como una herramienta confiable, simple y replicable para la estimación de emisiones en vías no pavimentadas, constituyendo una base técnica útil para la gestión de la calidad del aire y la planificación del mantenimiento vial en el municipio de Tarija.

5.2. Recomendaciones

- Implementar medidas de control de polvo en los barrios identificados como críticos (Constructor, Las Flores y 26 de agosto), mediante riego periódico, estabilización química o pavimentación selectiva, priorizando los tramos con mayor VPD y contenido de finos.
- Incorporar el modelo calibrado ($K_{opt} = 0,57$) en los programas municipales de monitoreo ambiental, como herramienta de estimación rápida de emisiones en vías no pavimentadas y evaluación de escenarios de mitigación.
- Ampliar el monitoreo de PM_{10} a otras épocas del año (temporada húmeda y de transición), para evaluar la influencia de la humedad relativa y la precipitación en las concentraciones de polvo.
- Incrementar el número de puntos de muestreo en futuras investigaciones, especialmente en zonas rurales y de acceso a canteras o industrias, para fortalecer la calibración del modelo y mejorar la representatividad espacial.

- Considerar variables meteorológicas dinámicas (velocidad del viento, humedad superficial y temperatura) en versiones futuras del modelo, con el fin de mejorar la precisión de las estimaciones.
- Promover el control de velocidad en zonas urbanas y periurbanas mediante señalización o reductores físicos, dado que la variable V_{85} mostró una influencia significativa ($r = 0,57$) sobre la concentración de PM_{10} .
- Integrar el modelo AP-42 calibrado con sistemas de información geográfica (SIG) para generar mapas de emisiones y calidad del aire, útiles para la toma de decisiones ambientales y urbanas.
- Fomentar la coordinación institucional entre el Gobierno Municipal de Tarija, la Gobernación y universidades locales para el desarrollo de proyectos conjuntos orientados a la gestión de vías no pavimentadas y monitoreo de la contaminación por polvo.