

**EVALUACIÓN POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
PIEZOELÉCTRICA EN LOS ANDENES: ESTUDIO DE CASO CALLE 85 DE
BARRANQUILLA.**

Jorge Andrés Barreto Jiménez,

Marlon Jesús Parada

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Asesores:

Ingeniero. Javier Carpintero Durango

Ingeniero. Otto Mora Lerma

Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil Barranquilla,

Colombia2020

Dedicatoria

A mis padres quienes me dieron la vida, me
han brindado educación y con su apoyo y
consejos me han formado como la persona
que hoy día soy.

Jorge Andrés Barreto Jiménez

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico principalmente a mi
Dios por ser mi fortaleza al enfrentarme a
cada obstáculo y no permitirme desistir.

A mi familia por su amor, constante
motivación y apoyo durante este proceso.

Marlon Jesús Parada de la Cruz

Agradecimientos

Agradezco una vez más a mis padres Jorge Isaac Barreto y Keidy Jiménez Zárate por su cariño y apoyo incondicional, por su confianza y todos los valores y principios que me han inculcado.

Infinitas gracias al Ingeniero Javier Carpintero Durango por su ardua labor como guía y tutor durante este proceso, por compartir sus amplios conocimientos, por toda la confianza depositada y sobre todo su interminable entusiasmo.

A los Ingenieros Otto Mora Lerma y Miguel Figueroa Loaiza por su acompañamiento y apoyo durante la vital etapa inicial y de estructuración del presente proyecto.

A mi gran amigo y compañero de proyecto Marlon Jesús Parada de la Cruz por su grata compañía y las experiencias vividas tanto en el presente proyecto como a lo largo de nuestra etapa de formación académica.

A mi amigo Jesús Calvo como gran apoyo moral durante el proceso y, en general, a todos aquellos amigos, familiares y futuros colegas que directa o indirectamente influyeron en el desarrollo de este proyecto.

Jorge Andrés Barreto Jiménez

Agradecimientos

A Dios quien me guió en cada paso del camino, me brindo la fortaleza y la perseverancia para no desmayar ante las adversidades y lograr culminar este logro, gracias por mi vida y la vida de las personas que amo, gracias por cada pequeño rasgo y vivencia que compone mi vida, ya que sin ello no sería quien soy.

A mis padres Sandra Judith De La Cruz Riquett y Martin José Parada Varela por haberme moldeado e inculcar los valores que me convirtieron en la persona que hoy soy, por su infinito amor, su sacrificio, constante lucha y apoyo incondicional, gracias por permitirme conocer de Dios, por preocuparse por mi formación como persona, por acompañarme en cada paso de la vida.

A mi hermano Martin Rafael Parada De La Cruz quien fue un eslabón importante en la obtención de este logro, pues su ejemplo de fortaleza, firmeza y gran corazón, además de su gran apoyo me motivaron a seguir adelante y a esforzarme por conseguir este sueño.

A mis hermanas Gisselle Patricia Parada De La Cruz y Sandra Elvira Parada De La Cruz que son una gran inspiración en mi vida, gracias por su amor, su apoyo y por creer en mí y en mis expectativas, pues me dieron la fuerza para no desfallecer.

A mi pareja quien me brindo un apoyo incondicional y desinteresado, gracias por su amor, compañía, por creer en mí y por su ejemplo de lucha, pues no desfallece ante las circunstancias, a través de su paciencia, consejos,

comprensión me ayudó a
obtener esta meta desde el amor.

A mi Gran amigo y compañero Jorge Andrés Barreto Jiménez por su perseverancia y compatibilidad de ideas, por no rendirse, por su apoyo y su amistad, por convivir como compañeros, amigos y colegas estos casi 5 años de desarrollo profesional.

Al ingeniero Javier Carpintero Durango por su compromiso, confianza e interminable entusiasmo y su apoyo incondicional como tutor y guía de esta tesis.

Al ingeniero Otto Mora Lerma por su impecable trabajo como cotutor y al ingeniero Miguel Figueroa Loaiza quienes en conjunto nos brindaron un incondicional apoyo y acompañamiento para la fase inicial de este proceso.

A mis familiares, amigos y todas aquellas personas que participaron, me apoyaron, creyeron en mí, en mis sueños, en mis expectativas o que de alguna manera aportaron emocionalmente a la obtención de este logro y

Gracias a la vida por este
este nuevo triunfo.

Marlon Jesús Parada de la cruz

Resumen

el presente escrito busca evaluar el potencial de generación de energía por efecto piezoeléctrico asociado a los flujos peatonales en la calle 85 de la ciudad de barranquilla, con el fin de disminuir externalidades asociadas a los proyectos de construcción vial, analizando los costos asociados a la implementación de estas tecnologías, su capacidad de generación energética, el ahorro monetario percibido por conceptos de electricidad, así como el impacto en la reducción de emisiones de CO_2 . se presentan unos modelos para la estimación de las pisadas presentes a lo largo del tramo de estudio, además de la cantidad de energía producida mediante la instalación de una red de baldosas piezoeléctricas en las superficies de los senderos peatonales y adicionalmente se establecen relaciones entre dicho potencial y los diferentes niveles de servicio y aquellas variables que influyen en estos, para proponer modelos matemáticos que permitan predecir el comportamiento energético en cualquier otro sendero peatonal. la investigación halló un potencial energético elevado y una disminución considerable en las emisiones, sin embargo, el análisis de viabilidad económica no arrojó los resultados esperados debido a los altos costos asociados a la implementación de red de baldosas. no obstante, se espera en un futuro la disminución en los precios de estas tecnologías, y con la ayuda de los modelos matemáticos como herramienta para la estimación del potencial de energía, se pretende localizar puntos donde la implementación de las baldosas sea viable.

palabras clave: energía, piezoelectricidad, nivel de servicio, potencial energético, flujos peatonales, baldosas piezoeléctricas

Abstract

the present work aims to assess the energy generation potential by piezoelectric effect, associated with the pedestrian flows at the 85th street of the city of barranquilla, looking forward to decreasing the externalities related to the road constructions projects by analyzing the costs linked to the implementation of these technologies, its energetic production capacity, the perceived monetary savings in energy fares, as well as the impact on the co2 emissions reduction. mathematical models are introduced to estimate the number of footsteps along the study section and the amount of produced energy as a result of the installation of a piezoelectric tiles network over the surface of the walking paths. additionally, the relation between this potential and the level of service of the paths was used to establish equations that allows to predict the energetic behavior of any other pedestrian path. the research found a high energetic potential along with a considerable reduction in emissions, however, the economic feasibility analysis did not show the expected results due to the elevated cost related to the implementation of the tiles network. nevertheless, expecting the reduction in prices of this kind of technologies in the future, and with the help of the established equations as a tool to estimate the energetic potential, it is intended to locate points where the implementation of the tiles is feasible.

keywords: energy, piezoelectricity, level of service, energetic potential, pedestrian flows, piezoelectric tiles

Contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 9 |
| 2. Descripción del problema..... | 11 |
| 3. Justificación..... | 12 |
| 4. Objetivos | 14 |
| 4.1. Objetivo General..... | 14 |
| 4.2. Objetivos específicos | 14 |
| 5. Estado del arte | 16 |
| 5.1. Energía | 16 |
| 5.2. Efecto piezoeléctrico y energy harvesting | 18 |
| 5.3. Energías renovables | 19 |
| 6. Metodología | 21 |
| 7. Resultados | 23 |
| 8. Cálculos..... | 28 |
| 8.1. Nivel de servicio | 28 |
| 8.2. Número de pisadas | 30 |
| 8.3. Distribución de baldosas | 32 |
| 8.4. Distribución de pisadas en las baldosas. | 39 |
| 8.5. Potencial energético | 40 |
| 9. Análisis de resultados de correlación | 42 |
| 9.1. Correlación Costado Izquierdo | 43 |

| | | |
|------|---|----|
| 9.2. | Correlación Costado Derecho | 48 |
| 9.3. | Correlación De Totales (Ambos Costados) | 54 |
| 10. | Análisis de viabilidad económica | 59 |
| 11. | Análisis ambiental | 68 |
| 12. | Conclusiones..... | 69 |
| 13. | Referencias | 72 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Clasificación de niveles de servicio, HCM (Highway Capacity Manual)..... | 23 |
| Tabla 2 Dimensiones, flujos peatonales y condiciones de operación de los andenes de la calle 85.23 | |
| Tabla 3 Distribución de baldosas piezoeléctricas sobre los andenes de la calle 85 | 2 |
| 5 | |
| Tabla 4 Potencial energético producido en los andenes | 26 |
| Tabla 5 Clasificación de niveles de servicio, HCM (Highway Capacity Manual)..... | 28 |
| Tabla 6 Dimensiones geométricas de los andenes y flujos peatonales..... | 28 |
| Tabla 7 Espacio por peatón disponible..... | 29 |
| Tabla 8 Niveles de servicio por costado en los andenes de la calle 85. | 30 |
| Tabla 9 Longitudes y tiempos de recorrido en andenes | 31 |
| Tabla 10 Distribución diaria y anual de pisadas en los andenes y vida útil de baldosas..... | 32 |
| Tabla 11 Distribución de baldosas en los andenes | 39 |
| Tabla 12 Distribución de pisadas sobre las baldosas piezoeléctricas | 40 |
| Tabla 13 Potencial energético generado en los andenes..... | 41 |
| Tabla 14 Variables para la construcción del modelo, sección izquierda. | 43 |
| Tabla 15 Caracterización numérica de niveles de servicio..... | 44 |
| Tabla 16 Coeficientes de correlación ajustados, sección izquierda..... | 44 |
| Tabla 17 Significancia de variables, sección izquierda. | 47 |
| Tabla 18 Análisis de varianza, sección izquierda. | 47 |
| Tabla 19 Variables para la construcción del modelo, sección derecha. | 48 |
| Tabla 20 Coeficientes de correlación, sección derecha. | 49 |
| Tabla 21 Significancia de variables, sección derecha. | 52 |

| | |
|---|----|
| Tabla 22 Análisis de varianza, sección derecha. | 52 |
| Tabla 23 Variables para la construcción del modelo, ambas secciones | 54 |
| Tabla 24 Coeficientes de correlación ajustados, ambas secciones | 55 |
| Tabla 25 Significancia de variables, ambas secciones | 58 |
| Tabla 26 Análisis de varianza, ambas secciones | 58 |
| Tabla 27 Actividades básicas para la ejecución del proyecto..... | 59 |
| Tabla 28 Total de costos asociados al proyecto, costado izquierdo. | 60 |
| Tabla 29 Total de costos asociados al proyecto, costado derecho..... | 61 |
| Tabla 30 Mantenimiento y compra de equipos, costado izquierdo. | 62 |
| Tabla 31 Mantenimiento y compra de equipos, costado derecho..... | 62 |
| Tabla 32 Potencial energético y ahorro percibido, costado izquierdo..... | 63 |
| Tabla 33 Potencial energético y ahorro percibido, costado derecho. | 64 |
| Tabla 34 Amortización de costos a vida útil, costado izquierdo. | 65 |
| Tabla 35 Amortización de costos a vida útil, costado derecho..... | 65 |
| Tabla 36 Valor presente neto del proyecto, costado izquierdo..... | 66 |
| Tabla 37 Tabla 36 Valor presente neto del proyecto, costado derecho. | 67 |
| Tabla 38 Reducción de Co2 por efecto piezoeléctrico. | 68 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura: 1 Ficha técnica de baldosas PAVEGEN | 24 |
| Figura: 2 Cra 82..... | 33 |
| Figura: 3 Cra 70..... | 33 |
| Figura: 4 Cra 58..... | 33 |
| Figura: 5 Cra 57 | 33 |
| Figura: 6 Cra 51B..... | 34 |
| Figura: 7 Cra 50..... | 34 |
| Figura: 8 Cra 49C..... | 34 |
| Figura: 9 Cra 47..... | 34 |
| Figura: 10 Cra 46..... | 35 |
| Figura: 11 Cra 42H..... | 35 |
| Figura: 12 Cra 65..... | 35 |
| Figura: 13 Cra 59B | 35 |
| Figura 14 Cra 53..... | 36 |
| Figura: 15 Cra 43..... | 36 |
| Figura: 16 Cra 42G..... | 36 |
| Figura: 17 Cra 42D..... | 36 |
| Figura:19 Detalle Cra 70 | 37 |
| Figura 20 Detalle Cra 50 | 37 |
| Figura 21 Detalle Cra 47 | 37 |
| Figura 22 Detalle 59B | 37 |
| Figura 23 Detalle Cra 42H | 37 |
| Figura: 24 Baldosa Small | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura: 25 Baldosa Slim Demo | 38 |
| Figura: 26 Baldosa Medium | 38 |
| Figura: 27 Baldosa Large | 38 |
| Figura: 28 R cuadrada ajustada, sección izquierda..... | 45 |
| Figura: 29 Coeficiente de Mallows, sección izquierda..... | 45 |
| Figura: 30 Cuadrado medio del error, sección izquierda..... | 46 |
| Figura: 31 R cuadrada ajustada, sección derecha. | 50 |
| Figura: 32 Coeficiente de Mallows, sección derecha. | 50 |
| Figura: 33 Cuadrado medio del error, sección derecha. | 51 |
| Figura: 34 Superficie de respuesta de potencial energético en andén derecho..... | 53 |
| Figura:35 Superficie de respuesta de potencial energético en andén derecho..... | 53 |
| Figura: 36 R cuadrada ajustada, ambas secciones. | 56 |
| Figura: 37 Coeficiente de Mallows, ambas secciones..... | 56 |
| Figura: 38 Cuadrado medio del error, ambas secciones..... | 57 |

1. Introducción

La funcionalidad de algunos elementos que influyen en las condiciones de tránsito y experiencias percibidas por los usuarios sobre los tramos viales, tal como semáforos, luminarias públicas, anuncios publicitarios, entre otros, se encuentran ligados a consumos energéticos cuya procedencia se vincula a la quema de combustibles fósiles y, por tanto, su funcionamiento se asocia a huellas de carbono como resultado de procesos de combustión.

Ante estas problemáticas las energías renovables se han levantado como alternativas factibles para la generación de energía en el proceso de independización de los combustibles fósiles debido a sus fuentes virtualmente inagotables y el poco o nulo impacto ambiental que estas generan. Una de estas fuentes mencionadas es la energía piezoeléctrica junto con los procesos de energy harvesting (Colectores de energía) pensados para recolectar la energía disponible en el ambiente, usualmente “desperdiciada”, para posteriormente transformarla en energía eléctrica. Y una parte de este potencial no empleado ubica su procedencia en las huellas o pisadas producto de la acción de caminar. El joven visionario Laurence Kemball-Cook previsualizó esta idea y en 2009 dio el primer paso para volverla realidad fundando la empresa PAVEGEN, encargada de diseñar placas que aprovechan el efecto piezoeléctrico y sus propiedades de generación de energía a la deformación para capturar todo el potencial energético proveniente de los flujos peatonales.

El presente documento expondrá de forma concisa y consecutiva todo el proceso investigativo y los trabajos realizados en pro de relacionar los flujos peatonales y las condiciones de operabilidad de los andenes (Niveles de servicio) con la evaluación del potencial energético que podría ser obtenido a partir de estos, además de proponer modelos

matemáticos que permitan predecir dicha energía en virtud de ciertas características básicas inherentes de los andenes y su infraestructura.

2. Descripción del problema

Los andenes son los elementos destinados a la permanencia y circulación de peatones. De igual manera que las vías, dependiendo de sus características de infraestructura, estos pueden ser clasificados según su nivel de servicio, entendido como la descripción cualitativa de las condiciones de tránsito sobre el sendero peatonal. Dentro de la ciudad de Barranquilla, existen zonas con alta concurrencia peatonal. Solo en la zona Centro Histórico se posee un registro de datos base pico de 5500 peatones por hora entre las 8:15 am y 9:15 am. Otras zonas con una alta afluencia peatonal que pueden ser tomadas en cuenta al ser lugares que generan un gran acopio de personas, son las universidades, centros comerciales, estaciones de transportes masivos o zonas recreativas.

Recientemente un grupo de energías renovables no convencionales han tomado un interés para solucionar la creciente demanda energética. Una de estas es la recolección de energía basada en vibraciones y que es conocida como energía piezoeléctrica. El principio consiste en la captura de la energía residual del ambiente para luego convertirla en electricidad por principios de la mecánica de sólidos como la energía a la deformación.

Teniendo en cuenta que en el mercado existen tecnologías probadas para tomar la energía generada por el flujo peatonal, a través de la instalación de baldosas piezoeléctricas en zonas de alto tránsito peatonal, la finalidad de esta propuesta es, a través de un estudio de factibilidad, estimar el potencial de generación de electricidad por efecto piezoeléctrico a través de la movilidad peatonal de la comunidad, basando el estudio en una zona estratégica de la ciudad como lo es la Calle 85, el cual estará sujeto al nivel de serviciabilidad de los andenes.

3. Justificación

Día tras día, miles de personas transitan los andenes de la ciudad como parte normal de su rutina, bien sea para arribar a sus lugares de estudio o trabajo, algún lugar en específico o simplemente como habito deportivo. Una actividad tan cotidiana como lo es caminar podría resultar ser un gran aliado de las energías renovables, en cuanto las pisadas de cada transeúnte pueden ser convertidas en energía eléctrica.

De acuerdo con Laurence Kemball-Cook, fundador de PAVEGEN, una pisada en una baldosa piezoeléctrica comercial puede producir alrededor de 7 Joules. Esto infiere que, al año, para una pisada por metro cuadrado y usando como ejemplo el registro peatonal de la zona Centro Histórico, en el peor de los casos se obtendría un potencial de generación de energía por el flujo peatonal de:

$$\begin{aligned}
 \text{Potencial} = & \frac{7J}{\text{pisada} - \text{persona}} \times \frac{1 \text{ pisada}}{m^2} \times \frac{5.500 \text{ personas}}{\text{anden}} \times \frac{0,000277778Wh}{1J} \\
 & \times \frac{8760}{1 \text{ año}} \times \frac{1MWh}{1'000.000Wh}
 \end{aligned}$$

$$0,094 \text{ MWh}$$

$$\text{Potencial} \approx \frac{\text{año} * m^2 * \text{anden}}{\text{año} * m^2 * \text{anden}}$$

Al considerar este potencial, por unidad de superficie, se cree que dependería del área a cubrir por la tecnología piezoeléctrica para estimar cuánta energía es posible obtener. No obstante, hay que reconocer que la explotación de esta fuente de energía renovable no convencional depende de varios factores, como lo son la frecuencia de la movilidad peatonal según las horas del día en las zonas de la ciudad donde se planea hacer uso de las baldosas piezoeléctricas, y qué tanto es la relación costo beneficio para satisfacer la demanda energética de áreas comunes.

De ser favorable el empleo de esta alternativa energética, la reducción del impacto ambiental por emisiones de gases de efecto invernadero medido en toneladas equivalentes de CO₂ es posible estimarlo si se reflexiona que la cantidad de energía producida por las celdas piezoeléctricas sustituye en igual magnitud a la que se consumiría desde las redes eléctricas convencionales. Si se emplea un factor de emisión de 0,16438 kgCO₂eq/kWh esto sería similar a:

$$\begin{aligned} \text{Reducción de emisiones de CO}_2 &= \frac{0,094}{\text{año} * m^2 * \text{anden}} \times \frac{1000 \text{ kWh}}{1 \text{ MWh}} \times \frac{0,16438 \text{ kgCO}_2 \text{eq}}{\text{kWh}} = \\ &= \frac{15,45}{\text{año} * m^2} \text{ kgCO}_2 \text{eq} \end{aligned}$$

El interés de esta investigación reside en tener en cuenta el ritmo del tráfico peatonal en la zona de la ciudad seleccionada para conocer cuánta energía se puede recolectar por hora, por día y por año. Con la obtención de esta información será posible la apropiación de esta fuente de energía para comparar su disponibilidad con el consumo diario de áreas comunes como luminarias, semaforización, redes de internet, entre otros requerimientos energéticos en zonas públicas de la ciudad.

Finalmente, el estudio se realizará a lo largo de la calle 85 en virtud de los distintos usos de suelo que se pueden encontrar sobre esta misma; podemos ubicar zonas residenciales, zonas recreativas (Parques San Salvador, Dos villas y Electrificadora), zonas escolares (Institución educativa Santa Magdalena Sofia y Colegio Biffi La Salle), negocios, zonas bancarias, entre otros, lo que significa diversos flujos peatonales, es decir, un número variable de transeúntes cuyas pisadas representan una virtual cantidad de energía.

OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar el potencial energético en los senderos peatonales de la ciudad de Barranquilla a través de baldosas piezoeléctricas para satisfacer requerimientos en externalidades asociadas a los proyectos de construcción vial.

3.2. Objetivos específicos

- 3.2.1.** Especificar los niveles de servicio de los andenes de la calle 85 de la ciudad de Barranquilla, considerando factores como los aforos peatonales y dimensiones geométricas de los senderos, para la modelación del potencial energético del flujo peatonal por medio de la implementación de baldosas piezoeléctricas sobre estas superficies.

- 3.2.2.** Calcular el potencial energético producido en los andenes de la Calle 85 de la ciudad de barranquilla por efecto piezoeléctrico, teniendo en cuenta la cantidad de pisadas y su distribución sobre una red de baldosas generadoras de electricidad sobre estos senderos peatonales.
- 3.2.3.** Establecer un análisis de correlación entre el nivel de servicio, ancho de andenes, número de peatones y costado de andenes con el potencial energético provocado por las pisadas de transeúntes sobre los senderos peatonales de la calle 85 de la ciudad de Barranquilla, para la determinación de la incidencia de estos factores sobre la generación de energía por efecto piezoeléctrico en andenes.
- 3.2.4.** Analizar económicamente la implementación de baldosas piezoeléctricas sobre los senderos peatonales de la calle 85 de la ciudad de Barranquilla, para la viabilidad de su aplicación, teniendo en cuenta factores como el ahorro energético y las tipologías de costos asociadas al proyecto.

4. Estado Del Arte

4.1. Energía

El concepto de energía no es un tema sencillo. De acuerdo con (Tippens, 2007) la energía puede considerarse algo que es posible convertir en trabajo. Al decir que un objeto posee energía, significa que es capaz de ejercer una fuerza sobre otro objeto para realizar un trabajo sobre él. Por el contrario, si se realiza un trabajo sobre un objeto, se le ha proporcionado a éste una cantidad de energía igual al trabajo realizado. Al tiempo distingue entre dos tipos de energía de gran interés para la mecánica:

- Energía cinética, entendida como la energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento.
- Energía potencial, entendida como la energía que tiene un sistema en virtud de su posición o condición.

Se dice que toda masa m que tenga velocidad posee también energía cinética. No obstante, para que haya energía potencial es preciso tener el potencial de una fuerza aplicada. Por tanto, un objeto en sí no puede tener energía potencial; más bien, esta última ha de pertenecer al sistema.

Para (Young, 2018), el concepto de energía surge del principio de conservación de la energía: la energía es una cantidad que se puede convertir de una forma a otra, pero no puede crearse ni destruirse.

En el intento de darle un significado mediante el campo de la física, (Duit, 1984) llegó a la consideración de 5 aspectos básicos:

- I. **Concepto de energía**, siendo el más común la precondition o habilidad para realizar un trabajo.
- II. **Transferencia de energía**, siendo la cantidad que llamamos energía como se conceptualizó en el aspecto anterior, puede ser transferida de un sistema a otro. (De un lugar a otro).
- III. **Conversión de energía**, la cantidad que llamamos energía puede ocurrir de diversas formas y puede ser convertida de una forma a otra.
- IV. **Conservación de la energía**, cuando la energía es transferida de un sistema a otro, o convertida de un tipo a otro, la cantidad de energía no cambia.
- V. **Degradación de la energía**, cuando se habla de energía no se puede evitar también hablar de entropía.

Para (Hervas, n.d.), La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos.

Según (ALOMA, 2007), el concepto de energía no se define de forma explícita, sólo se hace referencia a términos como energía cinética, energía disponible, geotérmica, interna, potencial, rotacional, traslacional, etc. En los textos CB, JD, WR aparece el término energía en el capítulo que se refiere a la primera ley de la termodinámica, y vinculado directamente al principio de conservación de la energía, pero en ningún caso se expresa una definición precisa. Sólo el texto VSB ofrece una definición de energía, la cual establece que la energía es la capacidad de producir un efecto sin llegar a relacionarlo con el principio de conservación. Esta definición de energía se asemeja mucho a la concepción mecanicista de la energía que afirma que la energía es la capacidad para realizar trabajo y no concuerda con la que establecen López Rupérez y López Rupérez (citado en Hierrezuelo y Molina, 1990) y

Michinel y D'Alessandro Martínez (1994), en la que se expresa que la energía es una magnitud física que puede presentarse en diversas formas y originar procesos de transformación.

Otro concepto de energía que también podemos adoptar es el siguiente: Propiedad o magnitud física que puede transformarse o transmitirse y que interviene en los procesos de cambios de estado.

4.2. Efecto piezoeléctrico y energy harvesting

Bajo el enfoque de (Ertruk, A., 2011), al hablar de energy harvesting se hace referencia a tecnologías que aprovechan la energía desperdiciada del ambiente para proveer fuentes remotas de energía eléctrica y/o recargar dispositivos de almacenamiento tal como baterías y capacitores.

La piezoelectricidad es una forma de acoplamiento entre los comportamientos mecánicos y eléctricos de cerámicas y cristales de ciertas clases. Estos materiales exhiben el efecto piezoeléctrico, que ha sido dividido históricamente en dos fenómenos: efectos piezoeléctricos directos y opuestos. En términos simples, cuando un material piezoeléctrico es tensionado mecánicamente, se produce una polarización eléctrica proporcional al esfuerzo aplicado. Esto es llamado efecto piezoeléctrico directo. Cuando el mismo material es sujeto a una polarización eléctrica, este se tensa y la cantidad de esfuerzo es proporcional al campo de polarización. A esto se le llama efecto de piezoelectricidad opuesto o inverso.

Según (Fransisco, 2010), la piezoelectricidad es el termino general que describe la propiedad que exhiben algunos cristales (redes cristalinas) para llegar a polarizarse eléctricamente cuando se aplica una tensión, bien comprensiva, bien extensiva. El cuarzo es un buen ejemplo de materiales piezoeléctrico. Si el esfuerzo de compresión se aplica en el cristal, este

desarrollara un momento eléctrico proporcional a la fuerza aplicada (Efecto piezoeléctrico directo).

Recientemente, (Wang et al., 2020) estudiaron el rendimiento de colectores de energía piezoeléctrica, proponiendo el uso de colectores con extensiones elásticas para afinar e incrementar la productividad de estos mismos y obteniendo resultados positivos, soportados modelos matemáticos y simulaciones numéricas.

4.3. Energías renovables

Según (Merino Luis, 2003) “De entre las distintas fuentes de energía, las renovables son aquéllas que se producen de forma continua. Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica) provienen, en último término, del sol.

Su energía provoca las diferencias de presión atmosféricas que originan los vientos, fuente de la energía eólica. También provoca la evaporación del agua que luego precipita para formar ríos, los que permiten obtener energía hidráulica. Las plantas y algas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, origen de toda la materia orgánica (o biomasa) de la Tierra. Por último, el sol se aprovecha directamente como energía solar, tanto térmica como fotovoltaica.

Estas fuentes son inagotables a escala humana, aunque en el caso de la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales.”

La energía renovable es cualquier forma de energía de origen solar, geofísico o biológico que se renueva mediante procesos naturales a un ritmo igual o superior a su tasa de utilización.

Se obtiene de los flujos continuos o repetitivos de energía que se producen en el entorno natural y comprende tecnologías de baja emisión de carbono, como la energía solar, la hidroeléctrica, la eólica, la mareomotriz y del oleaje, y la energía térmica oceánica, así como combustibles renovables tales como la biomasa (IICA, 2014).

(Planeta, 2018), dice que las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida. También se consideran renovables cuando se obtienen a partir de fuentes que se regeneran con el tiempo de manera natural, como la masa forestal.

4.4. Nivel de servicio

De acuerdo con la (Hcm & Results, 2016) la calidad de un servicio requiere una medida cuantitativa para caracterizar las condiciones operacionales dentro de un flujo, sea peatonal o vehicular. El nivel de servicio es la medida cualitativa que describe las condiciones de tráfico, generalmente en términos de velocidad y tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones, comodidad y conveniencia.

Se definen seis niveles de servicio para cada condición de tráfico. A cada nivel se le asigna una letra, de la A a la F, A representando las mejores condiciones de operación y F las peores. Cada nivel de servicio representa un rango de condiciones de operación y la percepción del peatón sobre esas condiciones. La seguridad no se incluye en las medidas que establecen dichos niveles.

5. Metodología

Cómo primera instancia se realizó una revisión del estado del arte, con el fin obtener información relevante acerca de la energía piezoeléctrica, tales como su concepto, materiales piezoeléctricos, además de referencias y estadísticas de lugares en donde esta opción de obtención energética haya sido implementada.

Con el fin de establecer los niveles de servicio de los andenes a lo largo del tramo de estudio, se llevaron a cabo múltiples jornadas de medición con el objetivo de registrar las dimensiones geométricas de estos; con la ayuda de flexómetros y una cinta métrica tipo decámetro fueron obtenidos los anchos y longitudes de los senderos peatonales de la Calle 85 de la Ciudad de Barranquilla, además de las áreas ocupadas por aquellos elementos que pueden resultar en alteraciones de los flujos peatonales, así como restar espacio para la distribución de las placas piezoeléctricas, tales como materas o rampas de acceso.

Con la información proveniente de las mediciones, y haciendo uso del software AutoCAD, se modelaron gráficamente los andenes, brindando un soporte visual de la distribución espacial de los senderos, sobre los cuales se realizó la repartición de baldosas de acuerdo con las diferentes presentaciones disponibles en la ficha técnica procurando acaparar la mayor superficie posible, con el objeto de captar una mayor cantidad de pasos sobre las placas. El proceso de estimación del número de pisadas presentes en cada anden partió del previo análisis de un grupo de aforos peatonales realizados en las intersecciones a lo largo del tramo en estudio, de los cuales se obtuvieron el número de transeúntes que transitan en los sentidos paralelos la calle 85; dicha cantidad de pisadas se distribuyó de manera igualitaria sobre cada

placa, y mediante simples modelos matemáticos se calculó el potencial energético producido en cada sección estudiada.

A partir de los resultados obtenidos, y con ayuda del software estadístico Statgraphics, se evaluó la relación existente entre las variables que pueden llegar a afectar la cantidad de potencial que puede llegar a producir cada anden, buscando aquella que fuese más significativa para con base en esta proponer un modelo matemático que permita predecir el comportamiento energético en el corredor, a partir de dichas variables.

6. Resultados

A partir de las mediciones de campo realizadas en el tramo de estudio, el cual fue dividido en secciones limitadas por las carreras de la calle 85 de la ciudad de Barranquilla, se obtuvieron las dimensiones geométricas de los andenes y el flujo peatonal en los costados de cada carrera (Costado Izquierdo, Costado Derecho), a partir de los cuales se logró especificar los niveles de servicio del tramo en estudio.

| LOS | Space (m2/p) |
|-----|--------------|
| A | > 49 |
| B | > 8 - 49 |
| C | > 4 - 8 |
| D | > 2 - 4 |
| E | > 1 - 2 |
| F | ≤ 1 |

Tabla 1 Clasificación de niveles de servicio, HCM (Highway Capacity Manual).

| | | | | | | | | | |
|---------|----------|-------|-------|----------|----------|---------------------|---------------------|---|---|
| CR A | Longitud | Ancho | Ancho | Peatonal | Peatonal | Espacio | Espacio | N | N |
| | ud | I(m) | D | I | D | o | o | S | S |
| | (m) | | (m) | | | (m ² /P) | (m ² /P) | I | D |
| | | | | | | I | D | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|---------|----------|----------|-----|-----|------|------|---|---|
| 82 | 72 | 1,0 9 | 1,2 6 | 272 | 198 | 0,29 | 0,40 | F | F |
| 70 | 85 | 1,3 9 | 1,9 7 | 74 | 97 | 1,60 | 1,22 | E | E |
| 65 | 77 | 1,1 1 | 1,3 6 | 15 | 13 | 5,70 | 6,57 | C | C |
| 59B | 87 | 1,3 7 | 4,6 | 25 | 17 | 4,77 | 7,01 | C | C |
| 58 | 85 | 1,2 6 | 4 | 31 | 23 | 3,45 | 4,66 | D | C |
| 57 | 84 | 1,0 8 | 1,1 9 | 27 | 21 | 3,36 | 4,32 | D | C |
| 53 | 14 0 | 1,3 5 | 1,3 7 | 36 | 40 | 5,25 | 4,73 | C | C |
| 51B | 90 | 1,5 4 | 3,8 3 | 78 | 50 | 1,78 | 2,77 | E | D |
| 50 | 11 0 | 1,3 1 | 1,2 | 64 | 100 | 2,25 | 1,44 | D | E |
| 49C | 11 0 | 1,9 | 2,0 3 | 91 | 83 | 2,30 | 2,52 | D | D |
| 47 | 84 | 1,2 4 | 1,2 2 | 69 | 97 | 1,51 | 1,07 | E | E |
| 46 | 84 | 1,2 | 1,2 3 | 56 | 51 | 1,80 | 1,98 | E | E |

| | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------|----------|----|-----|-----------|------|---|---|
| 43 | 91 | 3,5 1 | 1,2 5 | 28 | 44 | 11,4 1 | 7,26 | B | C |
| 42H | 92 | 1,2 5 | 1,2 4 | 36 | 114 | 3,19 | 1,01 | D | E |
| 42G | 27 0 | 1,2 9 | 1,5 7 | 16 | 68 | 21,7 7 | 5,12 | B | C |
| 42B 1 | 22 0 | 0,8 | 1,2 6 | 33 | 32 | 5,33 | 5,50 | C | C |

Tabla 2 Dimensiones, flujos peatonales y condiciones de operación de los andenes de la calle 85.

Donde:

I = Izquierda

D = Derecha

NS = Nivel de servicio

Posteriormente, una vez realizada la modelación en AutoCAD empleando los datos obtenidos durante la medición se asignó una distribución de las baldosas para cada anden dando como resultado el número de baldosas a utilizar en el tramo de estudio.





| | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|
|  | <div>SMALL</div> <div>6 x generators</div> <div>1785 x 1334 mm (5' 10 1/2" x 4' 4 1/2")</div> <div>weight = 68 kg (150 lb)**</div> <div>For demo events and small installs.</div> |  | <div>MEDIUM</div> <div>20 x generators</div> <div>60 full tiles (30 half)</div> <div>5285 x 1334 mm (17' 4" x 4' 4 1/2")</div> <div>weight = 199 kg (439 lb)**</div> <div>For walk & light application (see p.5) and data connectivity.</div> <div>Flexible sizing and orientation based on location.</div> |  | <div>LARGE</div> <div>52 x generators</div> <div>140 full tiles (40 half)</div> <div>6785 x 2200 mm (22' 3" x 7' 2 1/4")</div> <div>weight = 423 kg (933 lb)**</div> <div>For walk & light, smart lighting, advertising and data connectivity.</div> <div>Flexible sizing and orientation based on location.</div> |
|  | <div>SLIM DEMO</div> <div>3 x generators</div> <div>901 x 1785 mm</div> <div>weight = 34 kg (75 lb)**</div> | | | | |

Figura:1 Ficha técnica de baldosas PAVEGEN.

| CRA | DISTRIBUCIÓN DE BALDOSAS | | | | | | | |
|------|-----------------------------|--------------|------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| | ANDEN IZQUIERDO | | | | ANDEN DERECHO | | | |
| | SMAL L | SLIM DEMO | MEDIU M | LARG E | SMAL L | SLIM DEMO | MEDIU M | LARG E |
| 82 | | 37 | | | | 32 | | |
| 70 | | | 16 | | 2 | | 15 | |
| 65 | | 43 | | | | 43 | | |
| 59B | | 48 | | | 6 | | | 24 |
| 58 | | 47 | | | 1 | | 16 | 12 |
| 57 | | 47 | | | | 47 | | |
| 53 | | 78 | | | | 78 | | |
| 51B | | | 17 | | | | | 13 |
| 50 | 2 | | 20 | | 11 | 28 | 2 | 12 |
| 49C | | 43 | 9 | 4 | 61 | | | |
| 47 | 12 | | | 8 | | 47 | | |
| 46 | | 46 | | | | 46 | | |
| 43 | | | | 13 | | 50 | | |
| 42H | | 51 | | | | 51 | | |
| 42G | | 150 | | | | | 51 | |
| 42B1 | | | | | | 122 | | |

Tabla 3 Distribución de baldosas piezoeléctricas sobre los andenes de la calle 85.

Finalizado el cálculo de la cantidad de pisadas presentes en cada anden, con base a los aforos realizados en las intersecciones del tramo de estudio, se procedió a distribuir las pisadas en cada baldosa de manera igualitaria, para luego a través de modelos matemáticos determinar el potencial energético.

| CR | ENERGÍA | | |
|-----|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| | A | | |
| A | A Izquier do (kWh) | A derech o (kWh) | TOTAL (kWh) |
| 82 | 1844,1 9 | 1594,9 8 | 3439,17 |
| 70 | 797,49 | 847,33 | 1644,82 |
| 65 | 2143,2 5 | 2143,2 5 | 4286,5 |
| 59B | 2392,4 6 | 1495,2 9 | 3887,75 |
| 58 | 2342,6 2 | 1445,4 5 | 3788,07 |
| 57 | 2342,6 2 | 2342,6 2 | 4685,24 |
| 53 | 3887,7 5 | 3887,7 5 | 7775,5 |
| 51B | 847,33 | 647,96 | 1495,29 |
| 50 | 1096,5 5 | 2641,6 8 | 3738,22 |

| | | | |
|-----|-------------|-------------|----------|
| 49C | 2791,2 1 | 3040,4 2 | 5831,63 |
| 47 | 996,86 | 2342,6 2 | 3339,48 |
| 46 | 2292,7 8 | 2292,7 8 | 4585,55 |
| 43 | 647,96 | 2492,1 5 | 3140,11 |
| 42H | 2541,9 9 | 2541,9 9 | 5083,98 |
| 42G | 7476,4 5 | 2541,9 9 | 10018,44 |
| 42B | 0 | 6080,8 | 6080,84 |
| 1 | | 4 | |

Tabla 4 Potencial energético producido en los andenes.

Donde A: Andén.

Adicionalmente con ayuda del software estadístico (Statgraphics, 2020) y sirviéndose de los resultados alcanzados se propone un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento energético del tramo, a partir de un análisis de correlación entre factores capaces de influir significativamente sobre la generación de energía por efecto piezoeléctrico.

Correlación costado izquierdo

$$\text{Potencial} = 10790,7 - (1941,89 * A) - (1619,55 * B) + (11,5923 * C)$$

Donde:

A = Ancho en metros del andén.

B = Nivel de servicio.

C = Número de peatones en el andén.

Correlación Costado Derecho

$$\textbf{Potencial} = 6012,49 - 692,583 * A - 581,611 * B$$

Donde:

A = Ancho en metros del andén.

B = Nivel de servicio.

Correlación de Totales (Ambos costados)

$$\textbf{Potencial total} = 8614,91 - 694,724 * A + 541,209 * B + 409,192 * C - 1380,98 * D$$

Donde:

A = Ancho en metros del andén derecho.

B = Ancho en metros del andén izquierdo.

C = Nivel de servicio del andén derecho.

D = Nivel de servicio del andén izquierdo.

7. Cálculos

7.1. Nivel de servicio

La determinación del nivel de servicio de un andén se realiza con base al criterio de espacio disponible (m^2/p) brindado por la HCM (Highway Capacity Manual) para los peatones que transitan sobre este.

| Nivel de servicio | Espacio (m^2/p) |
|-------------------|---------------------|
| A | > 49 |
| B | $> 8 - 49$ |
| C | $> 4 - 8$ |
| D | $> 2 - 4$ |
| E | $> 1 - 2$ |
| F | ≤ 1 |

Tabla 5 Clasificación de niveles de servicio, HCM (Highway Capacity Manual).

Para evaluar dicho criterio se realizó la medición de las dimensiones de los andenes de la calle 85, además de los aforos peatonales en cada tramo, obteniendo los siguientes resultados:

| CR | Longitud | Ancho I | Ancho D | Peatones I | Peatones D |
|----|----------|---------|---------|------------|------------|
| A | (m) | (m) | (m) | | |
| 82 | 72 | 1,09 | 1,26 | 272 | 198 |
| 70 | 85 | 1,39 | 1,97 | 74 | 97 |

| | | | | | |
|-----|-----|------|------|----|-----|
| 65 | 77 | 1,11 | 1,36 | 15 | 13 |
| 59B | 87 | 1,37 | 4,6 | 25 | 17 |
| 58 | 85 | 1,26 | 4 | 31 | 23 |
| 57 | 84 | 1,08 | 1,19 | 27 | 21 |
| 53 | 140 | 1,35 | 1,37 | 36 | 40 |
| 51B | 90 | 1,54 | 3,83 | 78 | 50 |
| 50 | 110 | 1,31 | 1,2 | 64 | 100 |
| 49C | 110 | 1,9 | 2,03 | 91 | 83 |
| 47 | 84 | 1,24 | 1,22 | 69 | 97 |
| 46 | 84 | 1,2 | 1,23 | 56 | 51 |
| 43 | 91 | 3,51 | 1,25 | 28 | 44 |
| 42H | 92 | 1,25 | 1,24 | 36 | 114 |
| 42G | 270 | 1,29 | 1,57 | 16 | 68 |
| 42B | 220 | 0,8 | 1,26 | 33 | 32 |
| 1 | | | | | |

Tabla 6 Dimensiones geométricas de los andenes y flujos peatonales.

Donde;

A = Andén

I= Izquierda

D = Derecha

El criterio de espacio presente para cada peatón es el resultado del producto de la longitud del andén por el cociente entre el ancho del andén y el número de peatones en este mismo; cabe resaltar que debido a la irregularidad que presentan los andenes y para efectos prácticos en los cálculos se hizo uso de un ancho efectivo, correspondiente el mayor ancho presente a lo largo del andén.

m^2

Ancho [m]

Espacio [

$\frac{m}{p}] = Longitud [m] * \frac{Ancho [m]}{\#Peatones}$

A continuación, los resultados obtenidos:

| CR | Espacio | Espacio |
|----|----------|----------|
| A | (m2/P) I | (m2/P) D |
| 82 | 0,29 | 0,40 |
| 70 | 1,60 | 1,22 |
| 65 | 5,70 | 6,57 |

| | | |
|-----|-------|------|
| 59B | 4,77 | 7,01 |
| 58 | 3,45 | 4,66 |
| 57 | 3,36 | 4,32 |
| 53 | 5,25 | 4,73 |
| 51B | 1,78 | 2,77 |
| 50 | 2,25 | 1,44 |
| 49C | 2,30 | 2,52 |
| 47 | 1,51 | 1,07 |
| 46 | 1,80 | 1,98 |
| 43 | 11,41 | 7,26 |
| 42H | 3,19 | 1,01 |
| 42G | 21,77 | 5,12 |
| 42B | 5,33 | 5,50 |
| 1 | | |

Tabla 7 Espacio por peatón disponible.

A partir de los datos anteriores se designó a cada tramo su respectivo nivel de servicio, así:

| CR | NS I | NS |
|-----|------|----|
| A | | D |
| 82 | F | F |
| 70 | E | E |
| 65 | C | C |
| 59B | C | C |
| 58 | D | C |
| 57 | D | C |
| 53 | C | C |
| 51B | E | D |
| 50 | D | E |
| 49C | D | D |
| 47 | E | E |
| 46 | E | E |
| 43 | B | C |
| 42H | D | E |
| 42G | B | C |
| 42B | C | C |
| 1 | | |

Tabla 8 Niveles de servicio por costado en los andenes de la calle 85.

7.2. Número de pisadas

El número de pisadas de un peatón corresponderá al producto de la cadencia de pasos por el tiempo de recorrido sobre el andén. El primer valor corresponde, de acuerdo con la literatura, a 1,91 pasos por segundo. En cuanto al tiempo de recorrido, dicho valor se obtiene del cociente entre la longitud del andén y la velocidad promedio de un peatón, que de acuerdo con la HCM se aproxima a 1,1 metros por segundo.

$$\#pisadas = Cadencia \left[\frac{pasos}{seg} \right] * T_{recorrido} [seg]$$

Longitud [m]

$$T_{recorrido} = \frac{Longitud [m]}{V_{pro} \left[\frac{m}{s} \right]}$$

[seg] =

m

Se obtuvieron los siguientes tiempos de recorrido para cada tramo:

| CR A | Longitud (m) | Tiempo de recorrido (seg) |
|---------|-----------------|---------------------------------|
| 82 | 72 | 65,45 |
| 70 | 85 | 77,27 |
| 65 | 77 | 70 |
| 59B | 87 | 79,09 |
| 58 | 85 | 77,27 |
| 57 | 84 | 76,36 |
| 53 | 14 0 | 127,2 7 |
| 51B | 90 | 81,82 |
| 50 | 11 0 | 100 |
| 49C | 11 0 | 100 |
| 47 | 84 | 76,36 |
| 46 | 84 | 76,36 |
| 43 | 91 | 82,73 |
| 42H | 92 | 83,64 |

| | | |
|-----|----|-------|
| 42G | 27 | 245,4 |
| | 0 | 5 |
| 42B | 22 | 200 |
| 1 | 0 | |

Tabla 9 Longitudes y tiempos de recorrido en andenes.

Al multiplicar los anteriores tiempos de recorrido por la cadencia de pasos obtenemos el número de pisadas de un peatón sobre el andén. Inmediatamente se multiplicará dicho valor por el número de peatones presentes en el andén para obtener el número de pisadas diarias sobre el tramo y posteriormente por 365 para tener el valor anual.

$$\#Pisadas\ diarias = \#pisadas * \#Peatones$$

$$\#Pisadas\ anuales = \#Pisadas\ diarias * 365$$

De igual manera, es posible determinar la vida útil real de las baldosas al dividir su duración estándar, que de acuerdo con el fabricante PAVEGEN corresponde a 20.000.000 de pisadas, entre el número de pisadas anuales en el tramo.

20.000.000 pisadas

$$V_{util} = \frac{20.000.000 \text{ pisadas}}{\text{\#Pisadas anuales}}$$

A continuación, se presentan de forma tabular los resultados obtenidos para ambos costados:

| CR A | DISTRIBUCIÓN DE PISADAS | | | | | | |
|---------|----------------------------|-----------------|-----------|------------------------|---------------|----------|------------------------|
| | X PEATON | ANDEN IZQUIERDO | | | ANDEN DERECHO | | |
| | | X DÍA | X AÑO | VIDA ÚTIL (Años) | X DÍA | X AÑO | VIDA ÚTIL (Años) |
| 82 | 12 | 34.27 | 12.509.28 | 1,6 | 24.94 | 9.106.02 | 2,2 |
| | 6 | 2 | 0 | | 8 | 0 | |
| 70 | 14 | 10.95 | 3.997.48 | 5 | 14.35 | 5.239.94 | 3,82 |
| | 8 | 2 | 0 | | 6 | 0 | |
| 65 | 13 | 2.010 | 733.650 | 27,26 | 1.742 | 635.830 | 31,45 |
| | 4 | | | | | | |
| 59B | 15 | 3.800 | 1.387.00 | 14,42 | 2.584 | 943.160 | 21,21 |
| | 2 | | 0 | | | | |
| 58 | 14 | 4.588 | 1.674.62 | 11,94 | 3.404 | 1.242.46 | 16,1 |
| | 8 | | 0 | | | 0 | |
| 57 | 14 | 3.942 | 1.438.83 | 13,9 | 3.066 | 1.119.09 | 17,87 |

| | | | | | | | |
|-----|----|-------|----------|-------|-------|----------|------|
| | 6 | | 0 | | | 0 | |
| 53 | 24 | 8.784 | 3.206.16 | 6,24 | 9.760 | 3.562.40 | 5,61 |
| | 4 | | 0 | | | 0 | |
| 51B | 15 | 12.24 | 4.469.79 | 4,47 | 7.850 | 2.865.25 | 6,98 |
| | 7 | 6 | 0 | | | 0 | |
| 50 | 19 | 12.22 | 4.461.76 | 4,48 | 19.10 | 6.971.50 | 2,87 |
| | 1 | 4 | 0 | | 0 | 0 | |
| 49C | 19 | 17.38 | 6.344.06 | 3,15 | 15.85 | 5.786.34 | 3,46 |
| | 1 | 1 | 5 | | 3 | 5 | |
| 47 | 14 | 10.07 | 3.677.01 | 5,44 | 14.16 | 5.169.13 | 3,87 |
| | 6 | 4 | 0 | | 2 | 0 | |
| 46 | 14 | 8.176 | 2.984.24 | 6,7 | 7.446 | 2.717.79 | 7,36 |
| | 6 | | 0 | | | 0 | |
| 43 | 15 | 4.452 | 1.624.98 | 12,31 | 6.996 | 2.553.54 | 7,83 |
| | 9 | | 0 | | | 0 | |
| 42H | 16 | 5.760 | 2.102.40 | 9,51 | 18.24 | 6.657.60 | 3 |
| | 0 | | 0 | | 0 | 0 | |
| 42G | 46 | 7.504 | 2.738.96 | 7,3 | 31.89 | 11.640.5 | 1,72 |
| | 9 | | 0 | | 2 | 80 | |
| 42B | 38 | 12.60 | 4.601.19 | 4,35 | 12.22 | 4.461.76 | 4,48 |
| 1 | 2 | 6 | 0 | | 4 | 0 | |

Tabla 10 Distribución diaria y anual de pisadas en los andenes y vida útil de baldosas.

7.3. Distribución de baldosas

Con las dimensiones de los andenes previamente mencionadas, estos fueron modelados gráficamente en el software (*AutoCAD*, 2018).

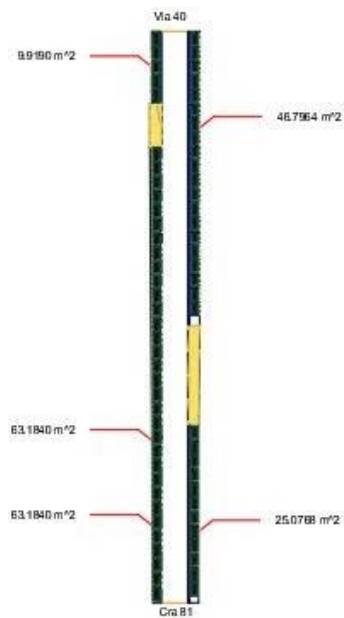


Figura 2 Cra 82

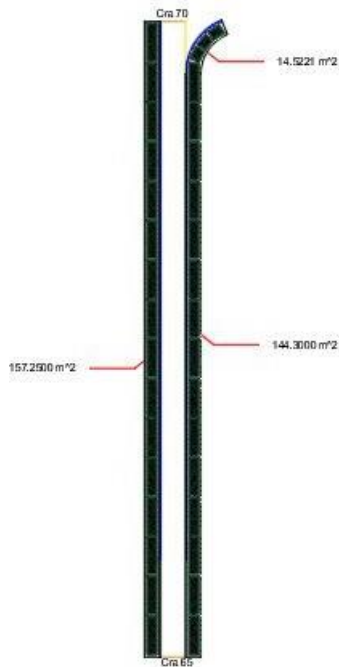


Figura 3 Cra 70

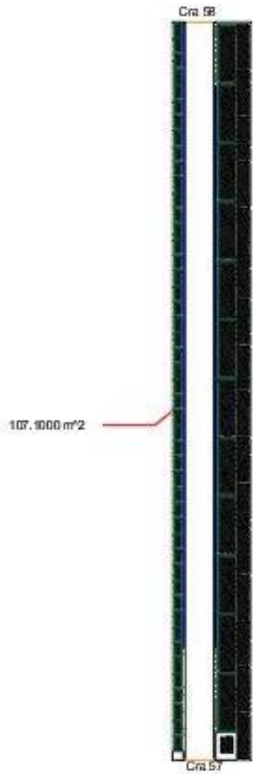


Figura 4 Cra 58

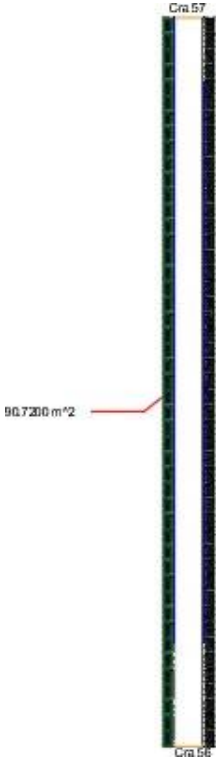
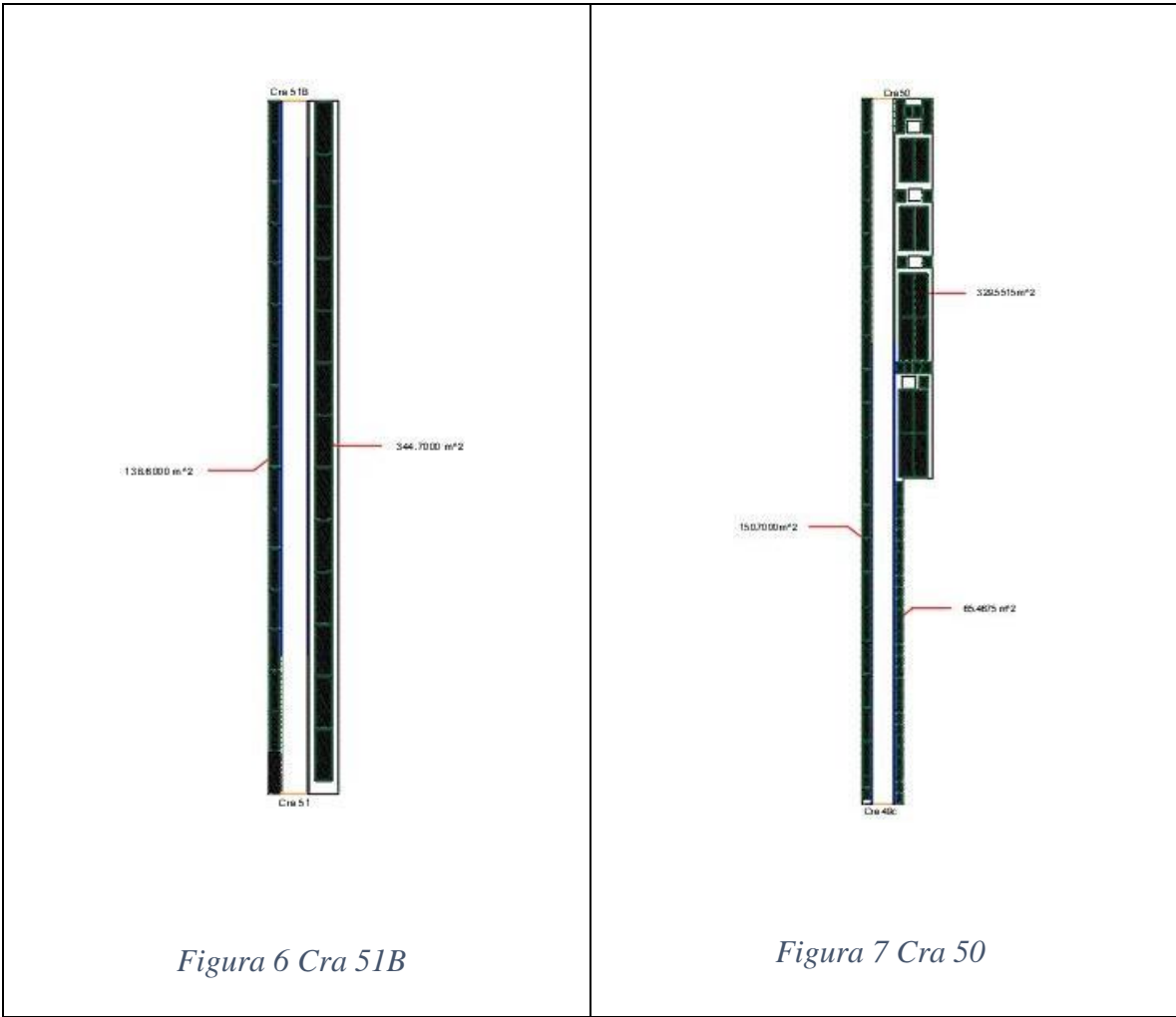
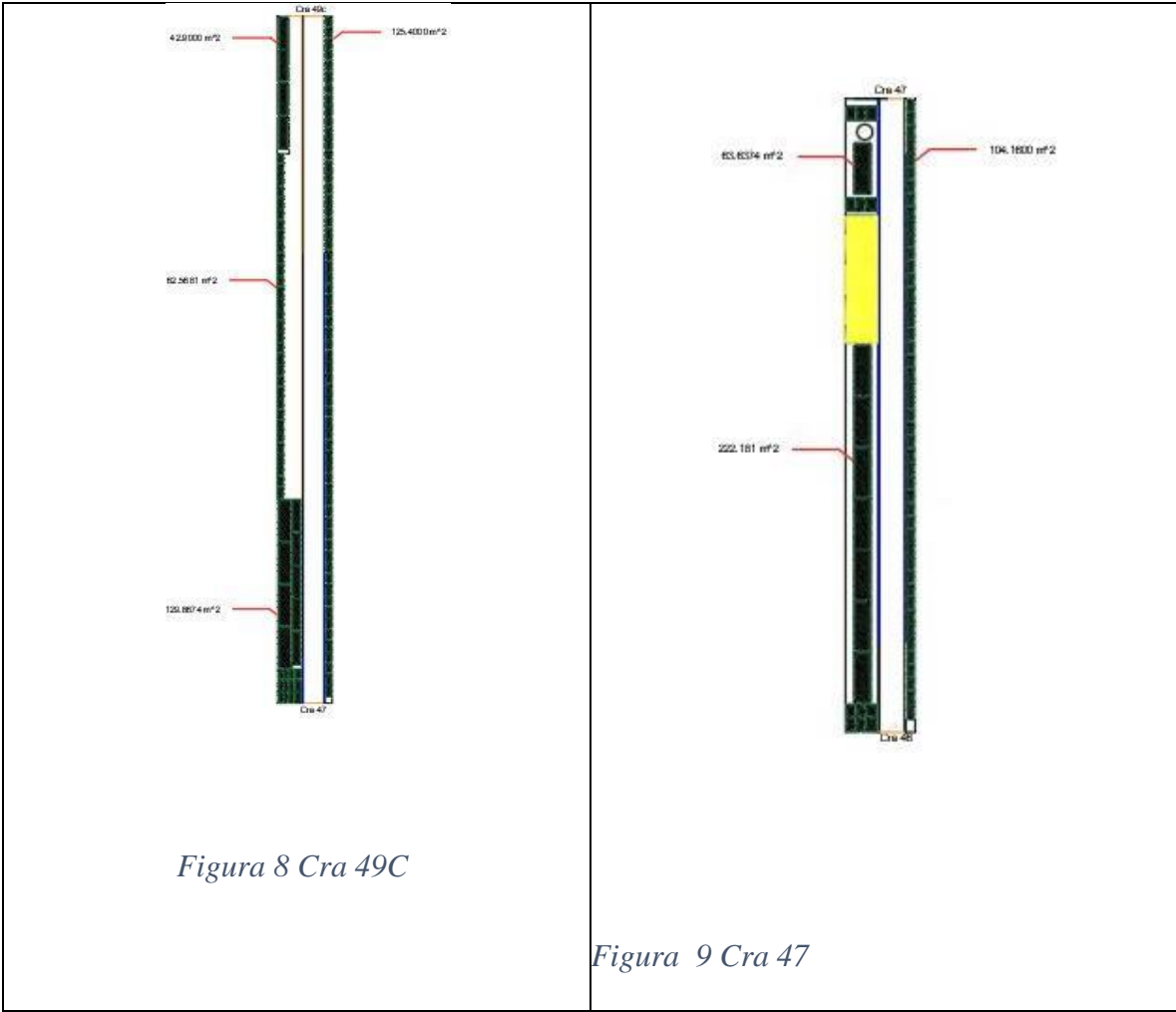


Figura 5 Cra 57





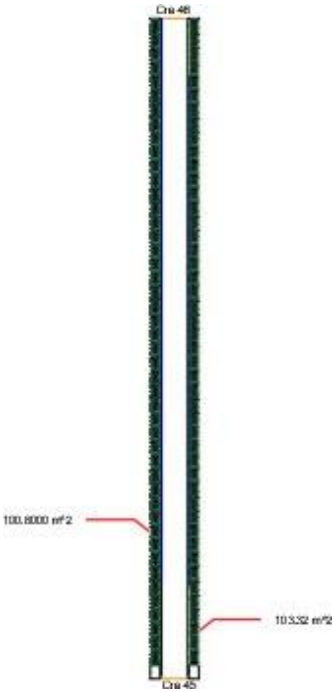


Figura 10 Cra 46

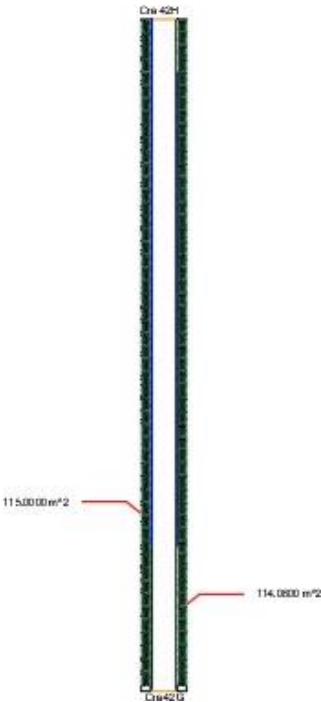
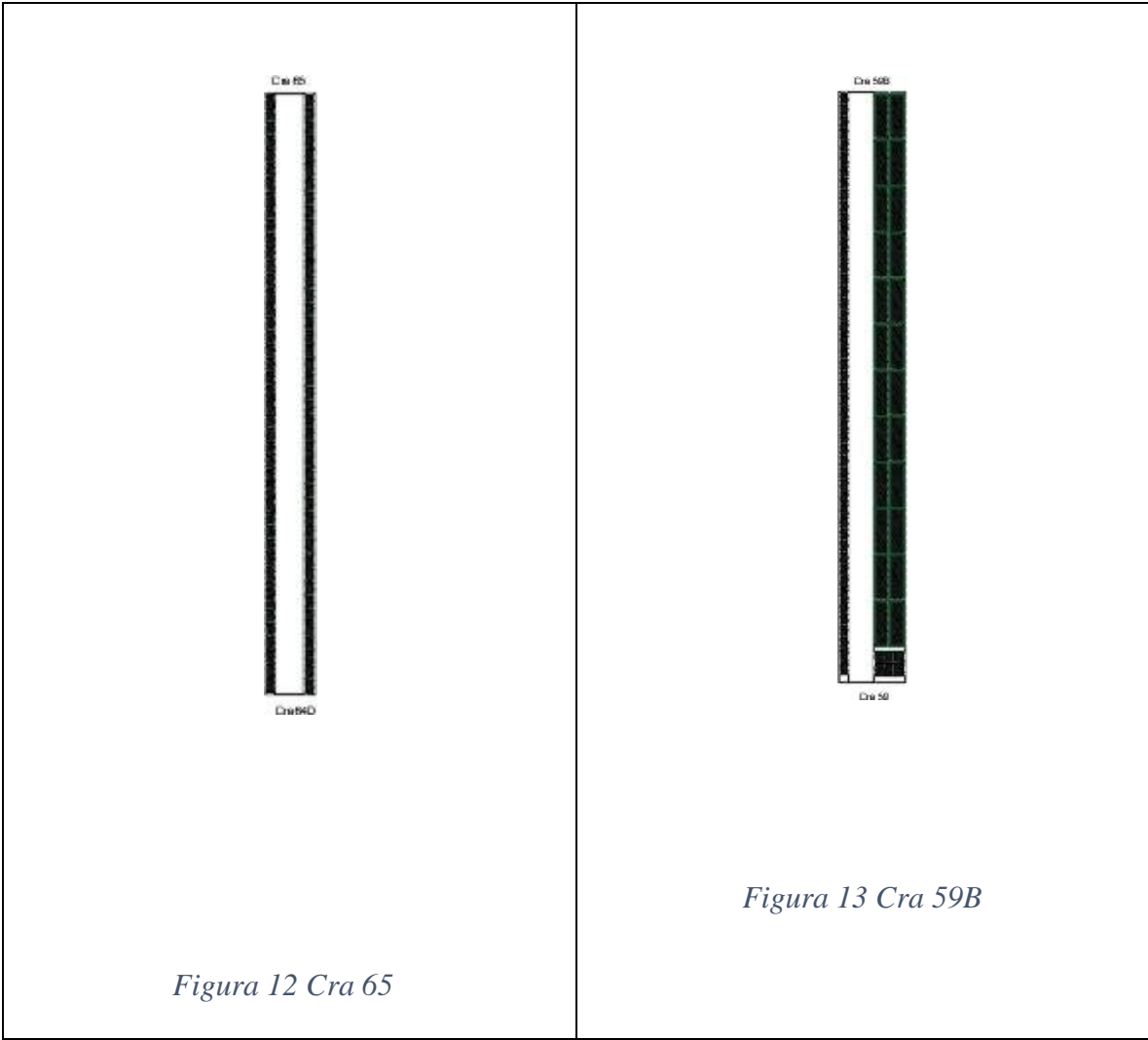






Figura 11 Cra 42H



| | |
|--|--|
|  <p><i>Figura 14 Cra 53</i></p> |  <p><i>Figura 15 Cra 43</i></p> |
|--|--|

| | |
|---|---|
|  <p><i>Figura 16 Cra 42G</i></p> |  <p><i>Figura 17 Cra 42D</i></p> |
|---|---|

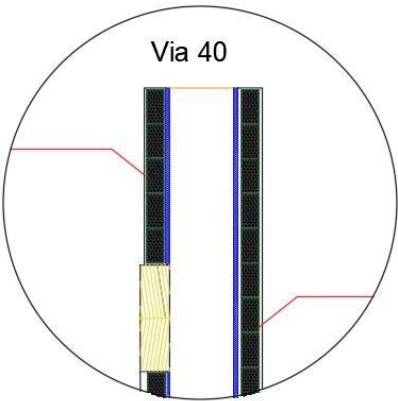


Figura 18 Detalle Cra 82 "Vía 40"

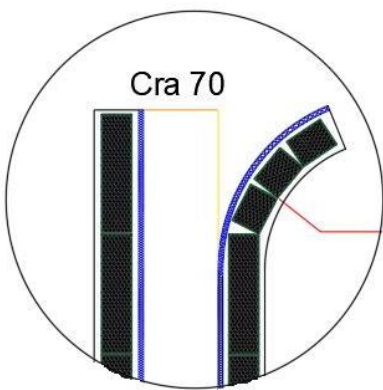


Figura 19 Detalle Cra 70

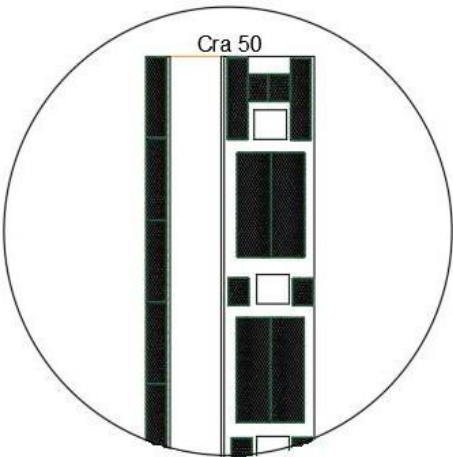


Figura 20 Detalle Cra 50

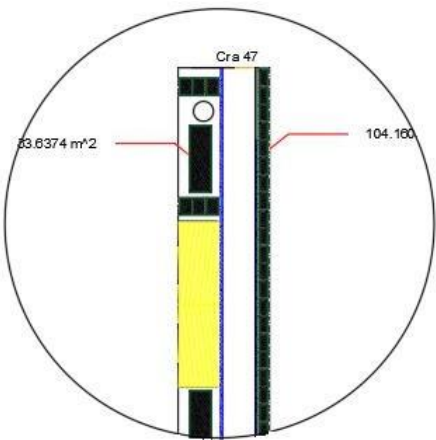


Figura 21 Detalle Cra 47

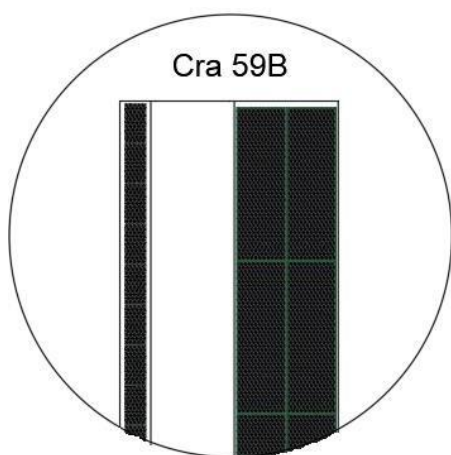
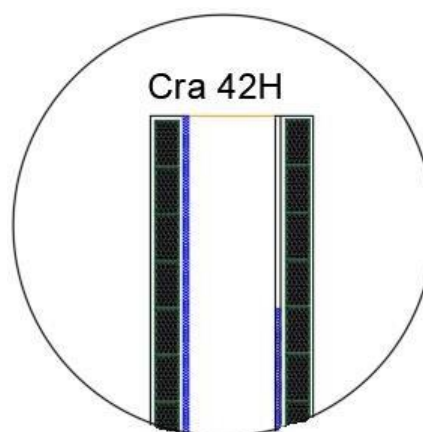


Figura 22 Detalle 59B



*Figura 23 Detalle Cra
42H*

La distribución de las placas piezoeléctricas se realizó teniendo en cuenta tanto el ancho de los andenes, así como las dimensiones propias de las baldosas, obtenidas de la ficha técnica, donde se distinguen 4 tipos:

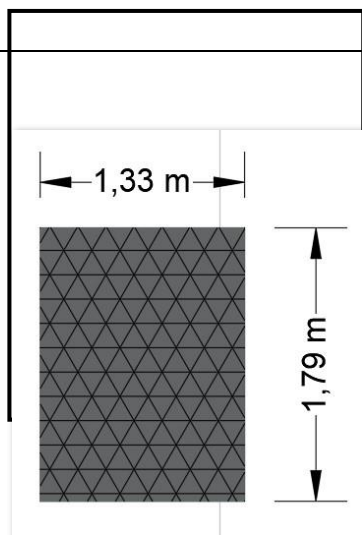
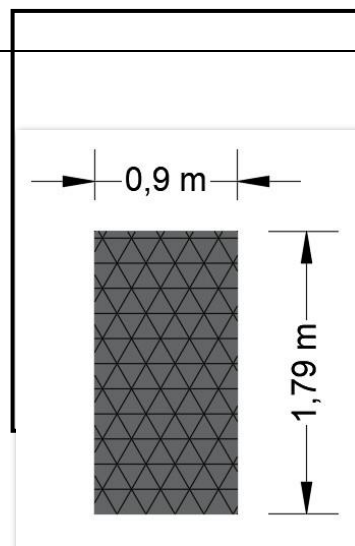


Figura 24 Baldosa Small



*Figura 25 Baldosa Slim
Demo*

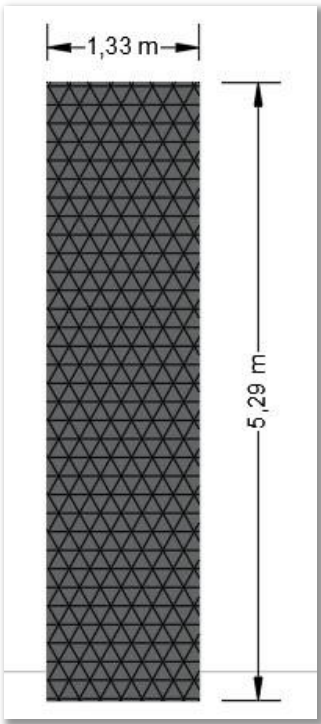


Figura 26 Baldosa Medium

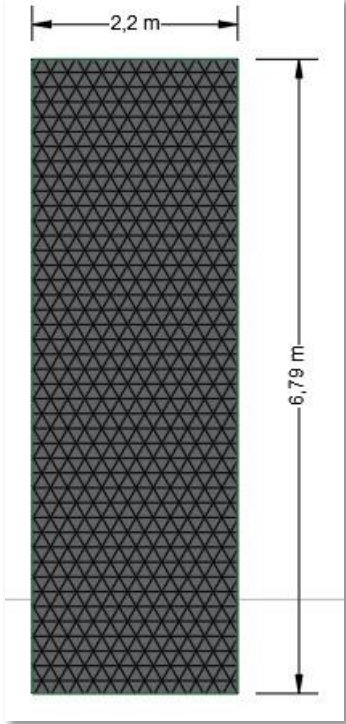


Figura 27 Baldosa Large

La siguiente tabla muestra los resultados de la distribución, haciendo distinción entre el tipo de baldosa utilizada:

| CR A | DISTRIBUCIÓN DE BALDOSAS | | | | | | | |
|---------|-----------------------------|----------------------|------------|-----------|---------------|----------------------|------------|-----------|
| | ANDEN IZQUIERDO | | | | ANDEN DERECHO | | | |
| | SMAL L | SLI M DEM O | MEDIU M | LARG E | SMAL L | SLI M DEM O | MEDIU M | LARG E |
| 82 | | 37 | | | | 32 | | |
| 70 | | | 16 | | 2 | | 15 | |
| 65 | | 43 | | | | 43 | | |
| 59B | | 48 | | | 6 | | | 24 |
| 58 | | 47 | | | 1 | | 16 | 12 |
| 57 | | 47 | | | | 47 | | |
| 53 | | 78 | | | | 78 | | |
| 51B | | | 17 | | | | | 13 |
| 50 | 2 | | 20 | | 11 | 28 | 2 | 12 |
| 49C | | 43 | 9 | 4 | 61 | | | |
| 47 | 12 | | | 8 | | 47 | | |
| 46 | | 46 | | | | 46 | | |
| 43 | | | | 13 | | 50 | | |
| 42H | | 51 | | | | 51 | | |

| | | | | | | | | |
|-----|--|-----|--|--|--|-----|----|--|
| 42G | | 150 | | | | | 51 | |
| 42B | | | | | | 122 | | |
| 1 | | | | | | | | |

Tabla 11 Distribución de baldosas en los andenes.

7.4. Distribución de pisadas en las baldosas.

Con el número de placas por anden resta calcular la cantidad de pisadas en cada baldosa, que corresponderá al producto de del número de placas por la cantidad de pisadas anuales en el andén.

$$\#Pisadas\ x\ baldosa = \#Pisadas\ anuales * \#Baldosas$$

A continuación, se muestran los resultados de manera tabular:

| CRA | PISADAS POR BALDOSA | | | | | | | |
|-----|------------------------|---------------------|--------------------|-------|----------------|---------------------|----------------|--------------------|
| | ANDEN IZQUIERDO | | | | ANDEN DERECHO | | | |
| | SMALL | SLIM DEMO | MEDIU M | LARGE | SMALL | SLIM DEMO | MEDIU M | LARGE |
| 82 | | 462.843. 36 0 | | | | 291.392. 64 0 | | |
| 70 | | | 63.959.6 8 0 | | 10.479.88 0 | | 78.599.10 0 | |
| 65 | | 31.546.9 50 | | | | 27.340.6 90 | | |
| 59B | | 66.576.0 00 | | | 5.658.96 0 | | | 22.635. 84 0 |
| 58 | | 78.707.1 40 | | | 1.242.46 0 | | 19.879.36 0 | 14.909. 52 0 |
| 57 | | 67.625.0 10 | | | | 52.597.2 30 | | |
| 53 | | 250.080. 48 0 | | | | 277.867. 20 0 | | |

| | | | | | | | | |
|-----|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 51B | | | 75.986.4 3 0 | | | | | 37.248. 25 0 |
| 50 | 8.923.52 0 | | 89.235.2 0 0 | | 76.686.50 0 | 195.202. 00 0 | 13.943.00 0 | 83.658. 00 0 |
| 49C | | 272.794. 79 5 | 57.096.5 8 5 | 25.376.2 6 0 | 352.967. 04 5 | | | |
| 47 | 44.124.1 2 0 | | | 29.416.0 8 0 | | 242.949. 11 0 | | |
| 46 | | 137.275. 04 0 | | | | 125.018. 34 0 | | |
| 43 | | | | 21.124.7 4 0 | | 127.677. 00 0 | | |
| 42H | | 107.222. 40 0 | | | | 339.537. 60 0 | | |
| 42G | | 410.844. 00 0 | | | | | 593.669. 58 0 | |
| 42B | | | | | | 544.334. | | |

| | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|----|--|--|
| 1 | | | | | | 72 | | |
| | | | | | | 0 | | |

Tabla 12 Distribución de pisadas sobre las baldosas piezoeléctricas.

7.5. Potencial energético

Para calcular el virtual potencial energético que producirá cada anden se hace necesario conocer cuanta energía puede producir una pisada promedio:

$$E_p = 1,3 * \bar{W} * g * \Delta_{baldosa}$$

Donde 1,3 se toma, de acuerdo con Nilsson y Thorstensson, como el valor de referencia de la fracción de nuestro peso que se ejerce al dar un paso, \bar{W} corresponde al peso promedio de un colombiano, de 70,35 Kg, g es la aceleración de la gravedad de 9,81 m/s² y $\Delta_{baldosa}$ es el

desplazamiento máximo de la baldosa que de acuerdo a la ficha técnica de PAVEGEN es de

10 mm. Entonces:

$$E = 1,3 * 705K * 9,81 \frac{m}{s^2} * \frac{10mm}{1000}$$

$$\Rightarrow E_p = 8,97 J$$

Siendo 9,87 Joules la energía producida por una pisada, para obtener la cantidad total de energía que se generaría en cada andén se debe hallar el producto de la sumatoria del número de pisadas en las baldosas de un tramo por la vida útil de las baldosas en el tramo y por la energía que genera una pisada.

$$W_t = \sum Pisadas \times baldosa * V_{util} * E_p$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:

| CR | ENERGÍA | | |
|----|---------|---|-------|
| | A | | |
| A | A | A | TOTAL |

| | Izquierd o (kWh/añ o) | derecho (kWh/añ o) | (kWh/añ o) |
|-----|--------------------------------|--------------------------|---------------|
| 82 | 1844,1 9 | 1594,98 | 3439,17 |
| 70 | 797,49 | 847,33 | 1644,82 |
| 65 | 2143,2 5 | 2143,25 | 4286,5 |
| 59B | 2392,4 6 | 1495,29 | 3887,75 |
| 58 | 2342,6 2 | 1445,45 | 3788,07 |
| 57 | 2342,6 2 | 2342,62 | 4685,24 |
| 53 | 3887,7 5 | 3887,75 | 7775,5 |
| 51B | 847,33 | 647,96 | 1495,29 |
| 50 | 1096,5 5 | 2641,68 | 3738,22 |
| 49C | 2791,2 1 | 3040,42 | 5831,63 |
| 47 | 996,86 | 2342,62 | 3339,48 |
| 46 | 2292,7 | 2292,78 | 4585,55 |

| | | | |
|-----|--------|---------|---------|
| | 8 | | |
| 43 | 647,96 | 2492,15 | 3140,11 |
| 42H | 2541,9 | 2541,99 | 5083,98 |
| | 9 | | |
| 42G | 7476,4 | 2541,99 | 10018,4 |
| | 5 | | 4 |
| 42B | 0 | 6080,84 | 6080,84 |
| 1 | | | |

Tabla 13 Potencial energético generado en los andenes.

8. Análisis de Resultados de correlación

Para obtener los valores de coeficiente de correlación se toman los datos de entrada que se creen afectarán el resultado de potencial energético y se someterán por medios computacionales a las siguientes ecuaciones. La primera de ella se refiere al cuadrado medio del error que se obtiene a través de la formulación

$$CME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - p - 1}$$

Donde y_i es el valor observado del potencial energético del andén izquierdo, \hat{y} es el valor predicho con el modelo ajustado y p es el número de variables independientes incluidas en el modelo que en este caso son tres. De otra parte, el coeficiente de determinación ajustado que complementa la cantidad de factores independientes evaluados en esta investigación se calcula con

$$R^2_{ajustado} = 100 \left(1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - 1} \right) \right)$$

$$R^2_{ajustado} = 100 \left(1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - p - 1} \right) \right)$$

Por último, la estadística C_p de Mallows que depende del cuadrado medio del error, evalúa la cantidad de sesgo del modelo respecto a la cantidad de variables independientes que posee

el modelo. Se espera que los valores de C_p no sean más grandes que el valor p . cuadrado medio del error completo es aquel donde se incluyen todas las variables independientes en el ajuste. En ese caso se escoge el más pequeño de los obtenidos del análisis. La fórmula empleada es

$$\sum^n (y_i - \hat{y})^2$$

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{CME \text{ (completo)}} - (n - 2p)$$

8.1. Correlación Costado Izquierdo

Se comienza con seleccionar un modelo de regresión que contribuya a escoger las variables independientes y sus interacciones que se usarán para construir un modelo de regresión múltiple para predecir el potencial energético en andenes. En este caso la tabla 14 se propone relacionar las variables que se creen impactan sobre el potencial energético para el andén izquierdo:

| Ancho andén Izquierdo (m) | Nivel de Servicio andén Izquierdo | | Peatones lado Izquierdo (personas) | P. Energético Andén Izquierdo (kWh/año) |
|---------------------------|-----------------------------------|---|------------------------------------|---|
| 1,09 | 6 | F | 272 | 1844,19 |
| 1,39 | 5 | E | 74 | 797,49 |
| 1,11 | 3 | C | 15 | 2143,25 |
| 1,37 | 3 | C | 25 | 2392,46 |
| 1,26 | 4 | D | 31 | 2342,62 |
| 1,08 | 4 | D | 27 | 2342,62 |
| 1,35 | 3 | C | 36 | 3887,75 |

| | | | | |
|------|---|---|----|-------------|
| 1,54 | 5 | E | 78 | 847,33 |
| 1,31 | 4 | D | 64 | 1096,5 5 |
| 1,9 | 4 | D | 91 | 2791,2 1 |
| 1,24 | 5 | E | 69 | 996,86 |
| 1,2 | 5 | E | 56 | 2292,7 8 |
| 3,51 | 2 | B | 28 | 647,96 |
| 1,25 | 4 | D | 36 | 2541,9 9 |
| 1,29 | 2 | B | 16 | 7476,4 5 |

Tabla 14 Variables para la construcción del modelo, sección izquierda.

Se asigna la siguiente numeración para incluir la variable nivel de servicio desde carácter categórico a carácter numérico como se observa en la tabla 15 y dos variables adicionales como el ancho del andén y la cantidad de personas que fluyen por la vía peatonal:

| Nivel de Servicio andén izquierdo | Numeración |
|--------------------------------------|------------|
| A | 1 |
| B | 2 |
| C | 3 |
| D | 4 |
| E | 5 |
| F | 6 |

Tabla 15 Caracterización numérica de niveles de servicio.

La tabla 16 resume los modelos que ofrecen los valores de coeficiente de correlación ajustada más alto. Valores grandes de R ajustado pertenecen a cuadrados medios del error CME pequeños. El modelo que mejor interpreta los resultados de acuerdo con los analizados es el que incluye las tres variables ancho del andén, nivel de servicio y cantidad de peatones en la vía.

| CME | R-Cuadrada Ajustada | Cp. | Variables Incluidas |
|---------------|------------------------|-------------|---------------------|
| 1,36272E 6 | 52,4286 | 4,0 | AB C |
| 1,54734E 6 | 45,9841 | 4,6256 6 | AB |
| 2,31644E | 19,1354 | 11,098 | B |

| | | | |
|----------|----------|--------|----|
| 6 | | 2 | |
| 2,43569E | 14,9726 | 12,448 | BC |
| 6 | | 4 | |
| 2,8581E | 0,226493 | 16,168 | AC |
| 6 | | 1 | |
| 2,86459E | 0,0 | 16,7 | C |
| 6 | | | |
| 2,86459E | 0,0 | 16,529 | A |
| 6 | | 7 | |
| 2,86459E | 0,0 | 16,429 | |
| 6 | | 5 | |

Tabla 16 Coeficientes de correlación ajustados, sección izquierda.

Donde:

- A = Ancho en metros del andén.
- B = Nivel de servicio.
- C = Número de peatones en el andén.

Los datos obtenidos en la tabla 16 se pueden visualizar a modo de gráficos como el de la R-cuadrada ajustada que perfila los datos más elevados respecto al número de coeficientes que se consideren dentro del estudio. La figura 27 describe cómo aumenta el coeficiente de correlación ajustada conforme incrementa la cantidad de variables y una constante en el

modelo a estudiarse. Para el caso de cuatro coeficientes (una constante y tres variables independientes), este modelo de potencial energético en el andén izquierdo de la vía mostró el R cuadrado ajustado más grande con un valor de 52,4%.

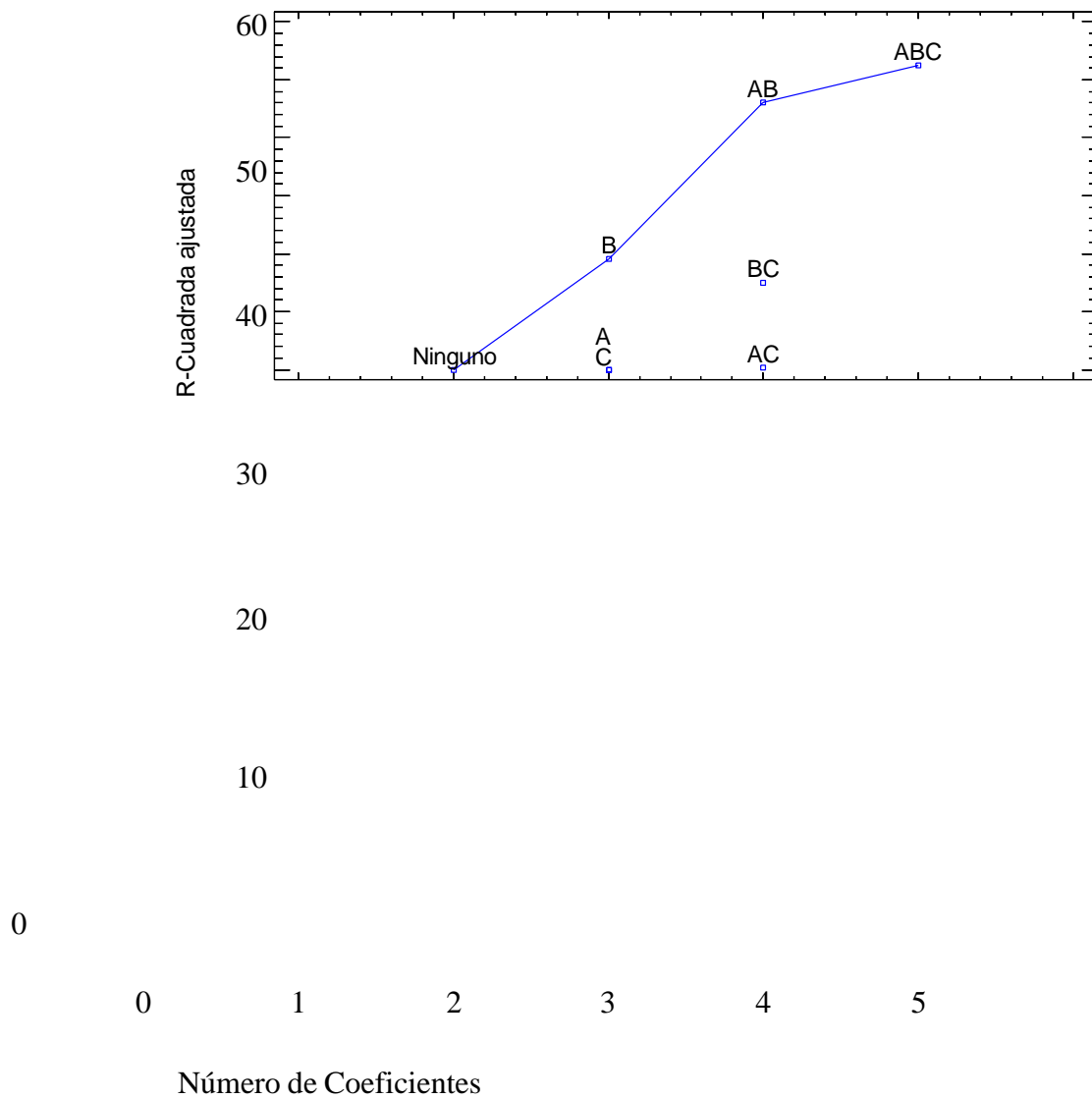


Ilustración 28 R cuadrada ajustada, sección izquierda.

En el caso del Cp de Mallows, la figura 28 muestra que aumentando el número de coeficientes hasta 4, se obtiene una estadística apropiada para el manejo de las variables independientes

del ancho del andén izquierdo, cantidad de peatones y nivel de servicio sobre el potencial energético por flujo peatonal en la vía.

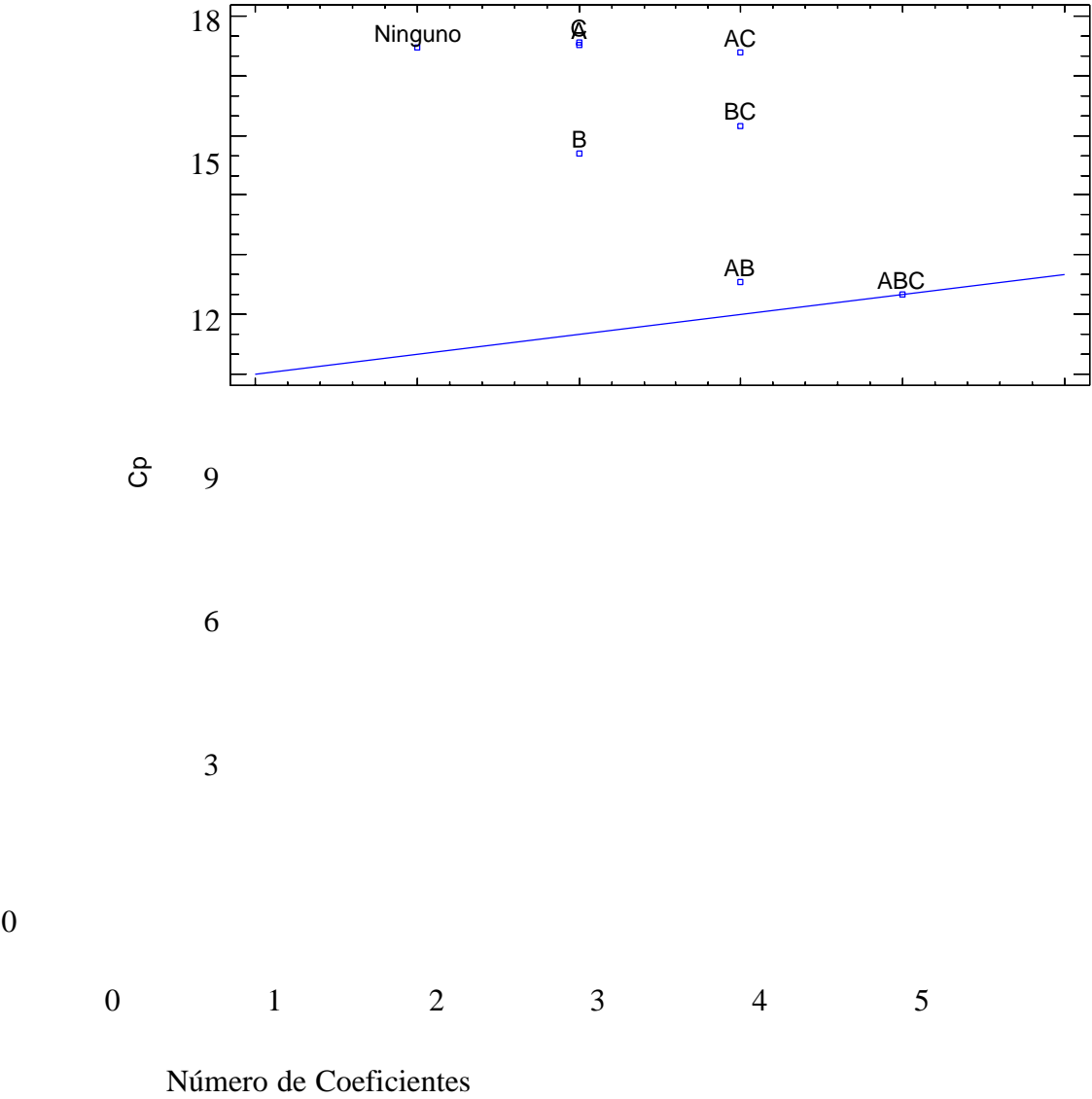


Ilustración 29 Coeficiente de Mallows, sección izquierda.

Por último, la figura 29 confirma la selección del número de coeficientes para el modelo de regresión, a través del gráfico del cuadrado medio del error respecto a estas variables independientes. Este indicador estima la varianza de las desviaciones con respecto al modelo ajustado. Según la tendencia, este indicador tiende a disminuir si se escoge como modelo que represente la correlación entre el potencial energético por flujo peatonal respecto al nivel de servicio, el ancho de andén y la cantidad de peatones a aquel que posea 4 coeficientes en el modelo, incluyendo la constante de ajuste.

(X 100000,)

37

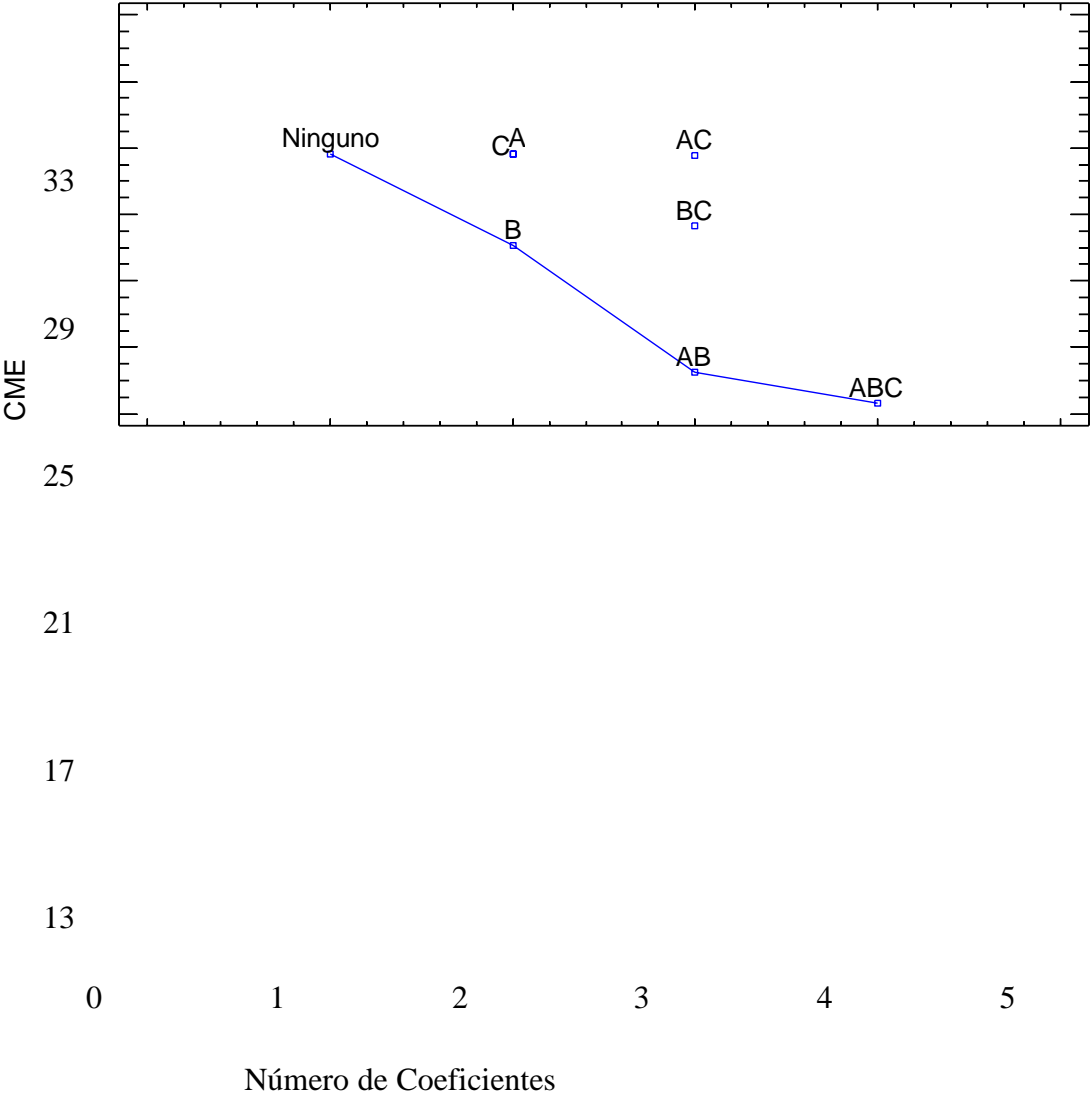


Ilustración 30 Cuadrado medio del error, sección izquierda.

Considerando los resultados anteriores se procede a realizar un análisis de regresión múltiple empleando las tres variables independientes sobre el potencial energético por flujo peatonal localizado en el andén izquierdo de la vía analizada. El modelo que mejor representa la correlación es

Potencial = 10790,7 – (1941,89 * A) – (1619,55 * B) + (11,5923 * C) Para describir el impacto de estas tres variables sobre el potencial energético del andén, se procede a emplear el estadístico t sobre la evaluación de la hipótesis nula asociada al

potencial energético igual a cero. La tabla 17 describe el valor P para cada variable independiente y la constante de ajuste comparado con el nivel de significancia de 0,05. Aquel valor P superior a este indicador puede ser descartado sin degradar significativamente el modelo descrito con las anteriores variables analizadas. En este caso, la variable de cantidad de peatones se puede remover del análisis sin problema alguno en la calidad de la predicción que tendría la ecuación de regresión no lineal descrita.

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Estadístico t | Valor-P |
|-------------------|------------|----------------|---------------|---------|
| CONSTANTE | 10790,7 | 2027,26 | 5,32283 | 0,0002 |
| ancho de andén | -1941,89 | 600,759 | -3,23239 | 0,0080 |
| nivel de servicio | -1619,55 | 430,266 | -3,76406 | 0,0031 |
| peatones | 11,5923 | 7,15404 | 1,62039 | 0,1334 |

Tabla 17 Significancia de variables, sección izquierda.

La tabla 18 presenta el análisis de varianza para el modelo propuesto. Dado que la prueba de valor P es inferior que el nivel de significancia de 0,05 tomado en esta investigación, se considera que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables y el potencial energético con un nivel de confianza del 95%.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------|-------------------|--------------------|----------------|---------|---------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|------------------|-----------|----|-----------|------|--------|
| Modelo | 2,51143E7 | 3 | 8,37143E6 | 6,14 | 0,0104 |
| Residuo | 1,499E7 | 11 | 1,36272E6 | | |
| Total (Corr.) | 4,01043E7 | 14 | | | |

Tabla 18 Análisis de varianza, sección izquierda.

8.2. Correlación costado derecho

De igual forma, se comenzará con seleccionar el modelo de regresión que contribuya a escoger las variables independientes y las interacciones a usar para construir un modelo de regresión múltiple que permita predecir el potencial energético en andenes. A continuación, se propone de manera tabular las variables que se creen impactan sobre el potencial energético para el andén derecho:

| Ancho D (m) | NS D | | Potencial (Kwh/año) |
|----------------|---------|---|------------------------|
| 1,26 | 6 | F | 1594,98 |
| 1,97 | 5 | E | 847,33 |
| 1,36 | 3 | C | 2143,25 |
| 4,6 | 3 | C | 1495,29 |
| 4 | 3 | C | 1445,45 |
| 1,19 | 3 | C | 2342,62 |
| 1,37 | 3 | C | 3887,75 |
| 3,83 | 4 | D | 647,96 |
| 1,2 | 5 | E | 2641,68 |
| 2,03 | 4 | D | 3040,42 |
| 1,22 | 5 | E | 2342,62 |
| 1,23 | 5 | E | 2292,78 |
| 1,25 | 3 | C | 2492,15 |
| 1,24 | 5 | E | 2541,99 |

| | | | |
|------|---|---|---------|
| 1,57 | 3 | C | 2541,99 |
| 1,26 | 3 | C | 6080,84 |

Tabla 19 Variables para la construcción del modelo, sección derecha.

Nuevamente se hace uso de la numeración descrita en la tabla 15 para incluir la variable nivel de servicio desde carácter categórico a carácter numérico y dos variables adicionales como el ancho del andén y la cantidad de personas que fluyen por la vía peatonal.

La siguiente tabla resume los modelos que ofrecen los valores de coeficiente de correlación ajustada más alto. Valores grandes de R ajustado pertenecen a cuadrados medios del error CME pequeños. El modelo que mejor interpreta los resultados de acuerdo con los analizados es el que incluye dos variables: ancho del andén y nivel de servicio.

| <i>CME</i> | <i>R- Cuadrada</i> | <i>Ajustada</i> | <i>Cp</i> | <i>Incluida s</i> |
|---------------|------------------------|-----------------|-----------|-----------------------|
| 1,02424E 6 | 45,0276 | 36,5703 | 3,0 | AB |
| 1,32578E 6 | 23,3701 | 17,8965 | 6,1216 | A |
| 1,56934E 6 | 9,29231 | 2,81319 | 9,45075 | B |
| 1,61476E 6 | 0,0 | 0,0 | 9,64821 | |

Tabla 20 Coeficientes de correlación, sección derecha.

Donde:

- A = Ancho en metros del andén.
- B = Nivel de servicio.

Los datos obtenidos en la tabla 20 se pueden visualizar a modo de gráficos como el de la R-cuadrada ajustada que perfila los datos más elevados respecto al número de coeficientes que se consideren dentro del estudio. La figura 30 describe cómo aumenta el coeficiente de

correlación ajustada conforme incrementa la cantidad de variables y una constante en el modelo a estudiarse. Para el caso de tres coeficientes (una constante y dos variables independientes), este modelo de potencial energético en el andén izquierdo de la vía mostró el R cuadrado ajustado más grande con un valor de 36,5%.

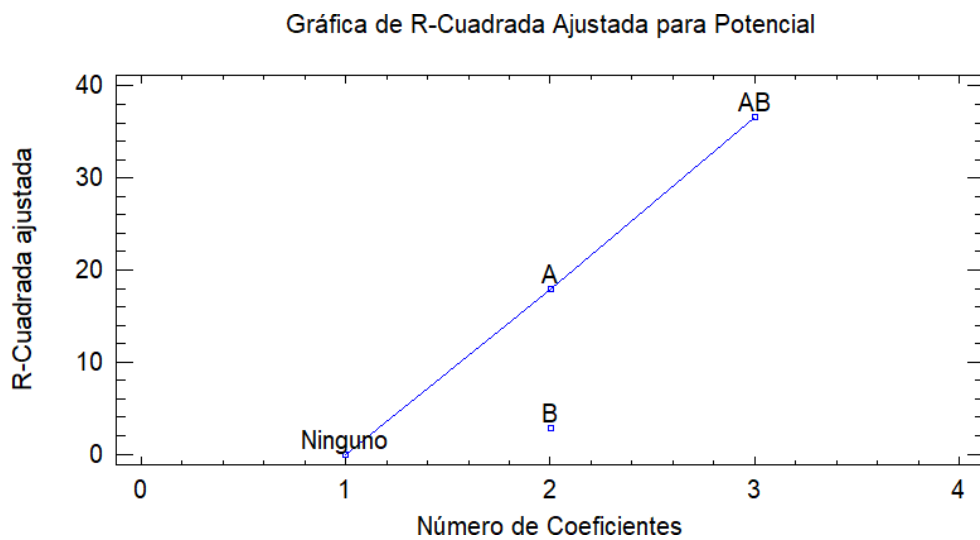


Ilustración 31 R cuadrada ajustada, sección derecha.

En el caso del Cp de Mallows, la figura 31 muestra que aumentando el número de coeficientes hasta 3, se obtiene una estadística apropiada para el manejo de las variables independientes del ancho del andén derecho y nivel de servicio sobre el potencial energético por flujo peatonal en la vía.

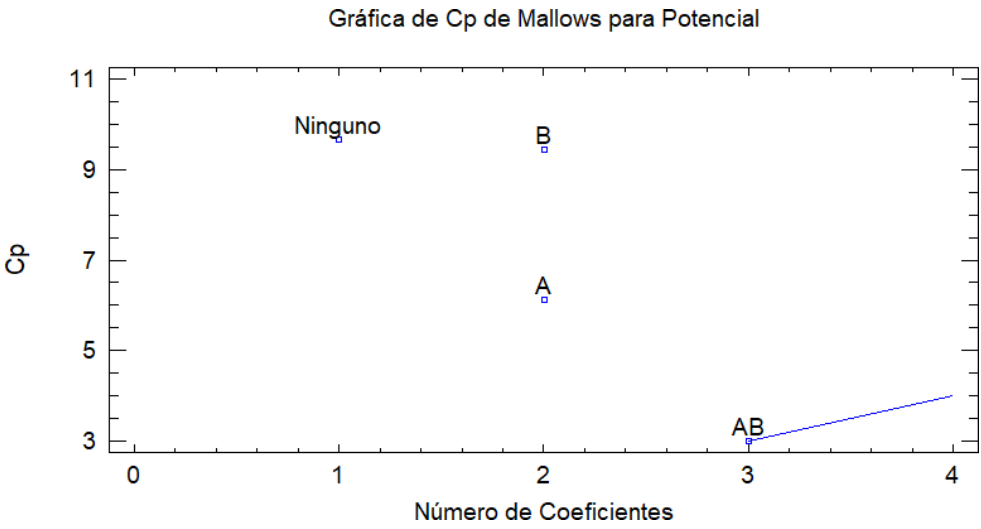


Ilustración 32 Coeficiente de Mallows, sección derecha.

Por último, la figura 32 confirma la selección del número de coeficientes para el modelo de regresión, a través del gráfico del cuadrado medio del error respecto a estas variables independientes. Este indicador estima la varianza de las desviaciones con respecto al modelo ajustado. Según la tendencia, este indicador tiende a disminuir si se escoge como modelo que represente la correlación entre el potencial energético por flujo peatonal respecto al nivel de servicio y el ancho de andén a aquel que posea 3 coeficientes en el modelo, incluyendo la constante de ajuste.

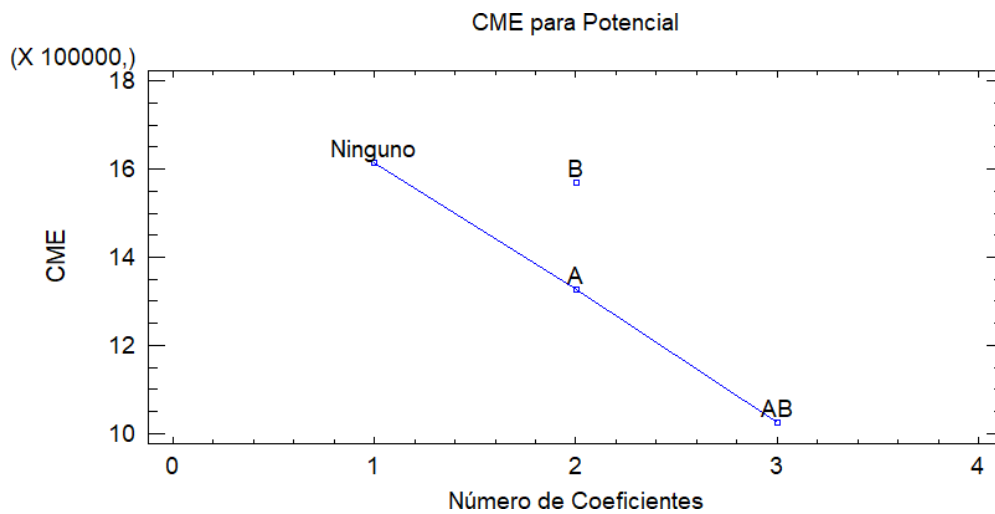


Ilustración 33 Cuadrado medio del error, sección derecha.

Considerando los resultados anteriores se procede a realizar un análisis de regresión múltiple empleando las dos variables independientes sobre el potencial energético por flujo peatonal localizado en el andén derecho de la vía analizada. El modelo que mejor representa la correlación es

$$\textit{Potencial} = 6012,49 - 692,583 * A - 581,611 * B$$

Para describir el impacto de estas tres variables sobre el potencial energético del andén, se procede a emplear el estadístico t sobre la evaluación de la hipótesis nula asociada al potencial energético igual a cero. La tabla 21 describe el valor P para cada variable independiente y la constante de ajuste comparado con el nivel de significancia de 0,05. Aquel valor P superior a este indicador puede ser descartado sin degradar significativamente el modelo descrito con las anteriores variables analizadas. En este caso, la variable de cantidad de peatones se puede remover del análisis sin problema alguno en la calidad de la predicción que tendría la ecuación de regresión no lineal descrita.

| <i>Parámetro</i> | <i>Estimació n</i> | <i>Estándar r</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
|------------------|------------------------|-----------------------|----------|----------------|
| CONSTANT E | 6012,49 | 1250,25 | 4,80903 | 0,0003 |
| Ancho | -692,583 | 238,245 | -2,90702 | 0,0122 |
| LoS | -581,611 | 256,998 | -2,2631 | 0,0414 |

Tabla 21 Significancia de variables, sección derecha.

La tabla 22 presenta el análisis de varianza para el modelo propuesto. Dado que la prueba de valor P es inferior que el nivel de significancia de 0,05 tomado en esta investigación, se considera que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables y el potencial energético con un nivel de confianza del 95%.

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1,09063E7 | 2 | 5,45317E6 | 5,32 | 0,0205 |

| | | | | | |
|------------------|-----------|----|-----------|--|--|
| Residuo | 1,33151E7 | 13 | 1,02424E6 | | |
| Total (Corr.) | 2,42215E7 | 15 | | | |

Tabla 22 Análisis de varianza, sección derecha.

Para este costado en particular es posible realizar una superficie de respuesta en función del modelo matemático obtenido, en cuanto consta únicamente de dos variables, brindando una ayuda visual para entender el comportamiento del potencial energético sobre este.

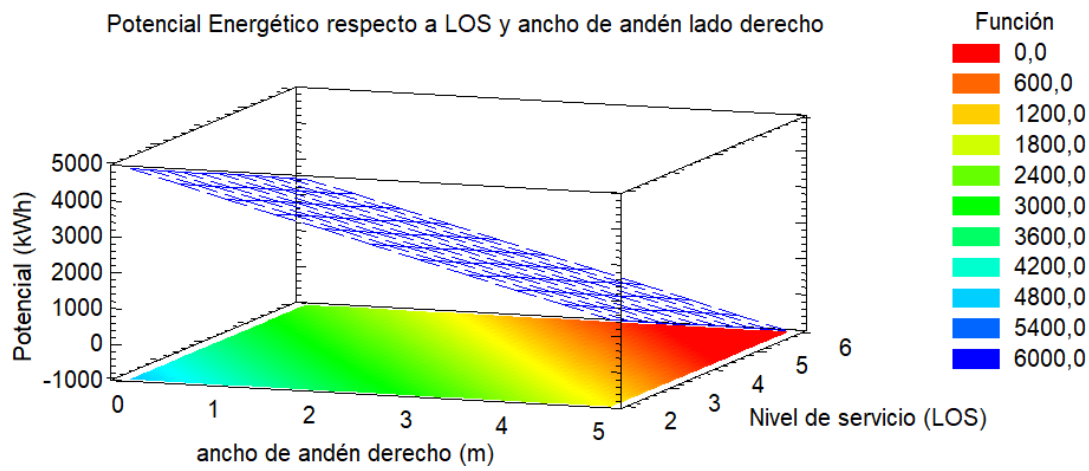


Ilustración 34 Superficie de respuesta de potencial energético en andén derecho.

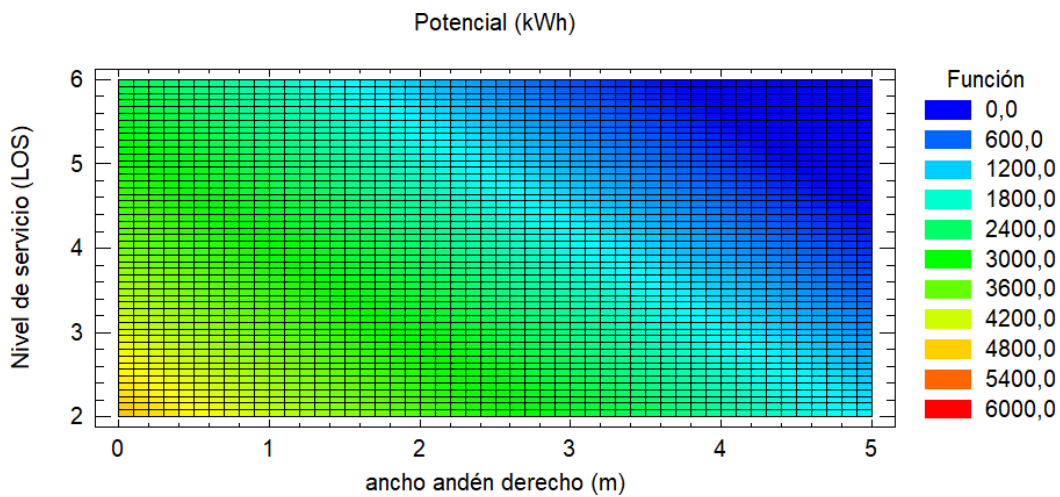


Ilustración 35 Superficie de respuesta de potencial energético en andén derecho.

8.3. Correlación De Totales (Ambos Costados)

Una vez más, se comenzará con la selección del modelo de regresión que contribuya a escoger las variables independientes y las interacciones a usar para construir un modelo de regresión múltiple que permita predecir el potencial energético en andenes. Sobre las variables que se creen impactarán en el potencial energético de ambos andenes, y teniendo en cuenta los resultados de los valores P de los anteriores modelos matemáticos, es posible descartar el número de peatones en los andenes como datos influyentes.

| Ancho derecho (m) | Ancho izquierdo (m) | NS D | | NS I | | Potencial total |
|----------------------|------------------------|---------|---|---------|---|--------------------|
| 1,26 | 1,09 | 6 | F | 6 | F | 3439,17 |
| 1,97 | 1,39 | 5 | E | 5 | E | 1644,82 |
| 1,36 | 1,11 | 3 | C | 3 | C | 3788,07 |
| 4,6 | 1,37 | 3 | C | 3 | C | 4685,24 |
| 4 | 1,26 | 3 | C | 4 | D | 1495,29 |
| 1,19 | 1,08 | 3 | C | 4 | D | 3738,22 |
| 1,37 | 1,35 | 3 | C | 3 | C | 5831,63 |
| 3,83 | 1,54 | 4 | D | 5 | E | 3339,48 |
| 1,2 | 1,31 | 5 | E | 4 | D | 4585,55 |
| 2,03 | 1,9 | 4 | D | 4 | D | 5083,98 |
| 1,22 | 1,24 | 5 | E | 5 | E | 4286,5 |
| 1,23 | 1,2 | 5 | E | 5 | E | 3887,75 |
| 1,25 | 3,51 | 3 | C | 2 | B | 7775,5 |
| 1,24 | 1,25 | 5 | E | 4 | D | 3140,11 |

| | | | | | | |
|------|------|---|---|---|---|----------|
| 1,57 | 1,29 | 3 | C | 2 | B | 10018,44 |
| 1,26 | 0,8 | 3 | C | 3 | C | 6080,84 |

Tabla 23 Variables para la construcción del modelo, ambas secciones.

La numeración para incluir la variable nivel de servicio desde carácter categórico a carácter numérico asignada, corresponde a la utilizada anteriormente.

De manera tabular se resumen los modelos que ofrecen los valores de coeficiente de correlación ajustada más alto. Valores grandes de R ajustado pertenecen a cuadrados medios

del error CME pequeños. El modelo que mejor interpreta los resultados de acuerdo con los analizados es el que incluye dos variables: ancho del andén y nivel de servicio.

| <i>CME</i> | <i>R- Cuadrada</i> | <i>Ajustada</i> | <i>Cp</i> | <i>Incluidas</i> |
|------------|------------------------|-----------------|-----------|------------------|
| 2,04119E6 | 61,4335 | 55,5002 | 1,80711 | CD |
| 2,06897E6 | 60,9085 | 54,8944 | 1,96784 | AD |
| 2,07994E6 | 63,7242 | 54,6553 | 3,1058 | ACD |
| 2,18421E6 | 61,9058 | 52,3822 | 3,66252 | ABD |
| 2,20383E6 | 61,5636 | 51,9545 | 3,76727 | BCD |
| 2,24741E6 | 64,0698 | 51,0043 | 5,0 | ABCD |
| 2,31035E6 | 52,99 | 49,6322 | 2,39207 | D |
| 2,438E6 | 53,9361 | 46,8494 | 4,10243 | BD |
| 3,22164E6 | 43,8121 | 29,7651 | 9,20189 | ABC |
| 3,33761E6 | 36,9386 | 27,2368 | 9,30621 | AC |
| 3,9133E6 | 26,0615 | 14,6864 | 12,6362 | BC |

| | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|---|
| 4,03539E 6 | 17,8896 | 12,0246 | 13,138 | C |
| 4,28086E 6 | 12,895 | 6,67322 | 14,6671 | B |
| 4,4877E6 | 8,68628 | 2,16387 | 15,9556 | A |
| 4,58696E 6 | 0,0 | 0,0 | 16,6149 | |

Tabla 24 Coeficientes de correlación ajustados, ambas secciones.

Donde:

- A = Ancho en metros del andén derecho.
- B = Ancho en metros del andén izquierdo.
- C = Nivel de servicio del andén derecho.
- D = Nivel de servicio del andén izquierdo.

Los datos obtenidos en la tabla 24 se pueden visualizar a modo de gráficos como el de la R-cuadrada ajustada que perfila los datos más elevados respecto al número de coeficientes que se consideren dentro del estudio. La figura 33 describe cómo aumenta el coeficiente de correlación ajustada conforme incrementa la cantidad de variables y una constante en el modelo a estudiarse. Para el caso de tres coeficientes (una constante y dos variables

independientes), este modelo de potencial energético en el andén izquierdo de la vía mostró el R cuadrado ajustado más grande con un valor de 55,5%.

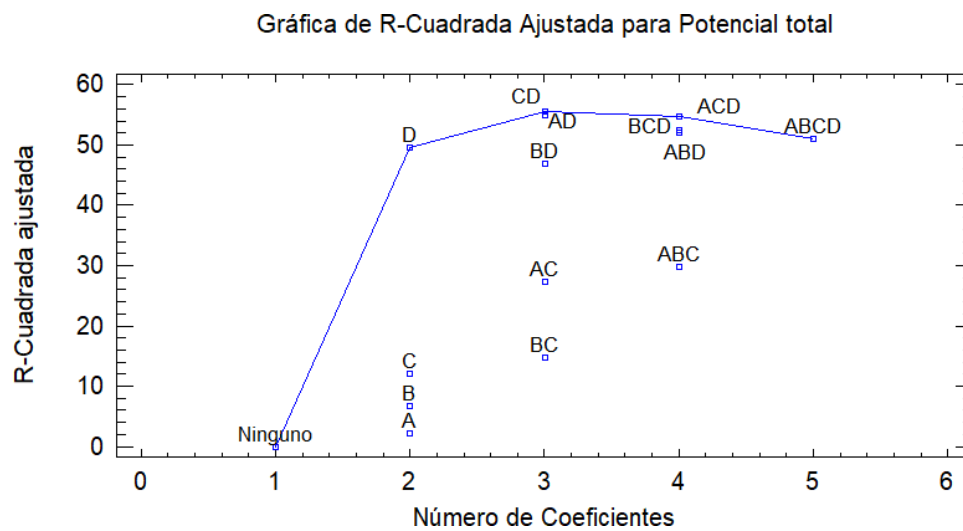


Ilustración 36 R cuadrada ajustada, ambas secciones.

En el caso del Cp de Mallows, la figura 34 muestra que aumentando el número de coeficientes hasta 3, se obtiene una estadística apropiada para el manejo de las variables independientes del ancho del andén derecho y nivel de servicio sobre el potencial energético por flujo peatonal en la vía.

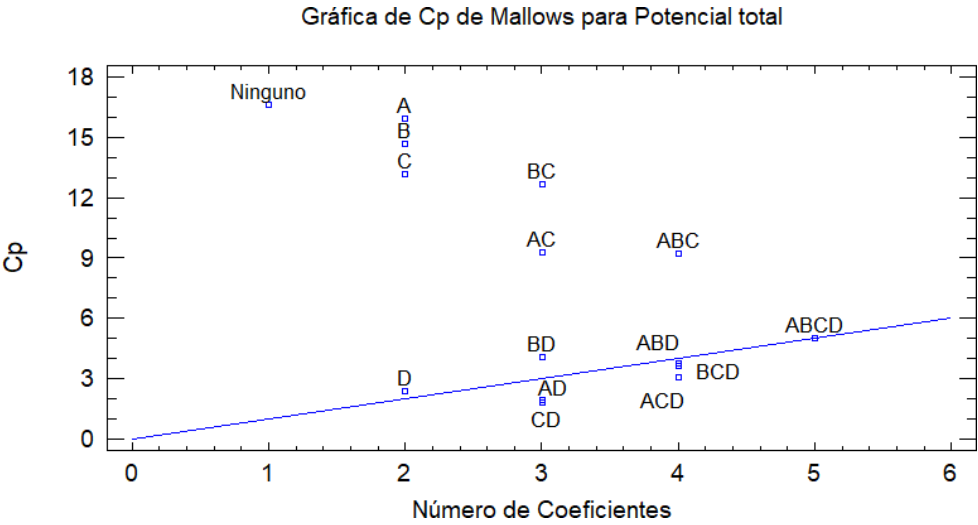


Ilustración 37 Coeficiente de Mallows, ambas secciones.

Por último, la figura 35 confirma la selección del número de coeficientes para el modelo de regresión, a través del gráfico del cuadrado medio del error respecto a estas variables independientes. Este indicador estima la varianza de las desviaciones con respecto al modelo ajustado. Según la tendencia, este indicador tiende a disminuir si se escoge como modelo que represente la correlación entre el potencial energético por flujo peatonal respecto al nivel de servicio y el ancho de andén a aquel que posea 3 coeficientes en el modelo, incluyendo la constante de ajuste.

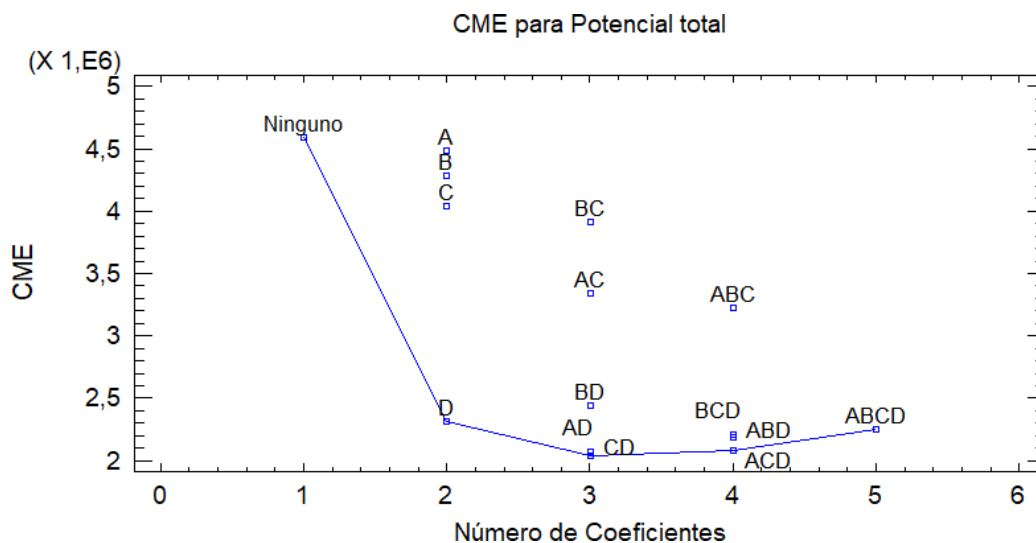


Ilustración 38 Cuadrado medio del error, ambas secciones.

Considerando los resultados anteriores se procede a realizar un análisis de regresión múltiple empleando las dos variables independientes sobre el potencial energético por flujo peatonal localizado en el andén derecho de la vía analizada. El modelo que mejor representa la correlación es

$$\begin{aligned} \textit{Potencial total} = & 9328,29 - 351,396 * A + 231,681 * B + 619,512 * C \\ & - 1773,75 * D \end{aligned}$$

Para describir el impacto de estas tres variables sobre el potencial energético del andén, se procede a emplear el estadístico t sobre la evaluación de la hipótesis nula asociada al potencial energético igual a cero. La tabla 25 describe el valor P para cada variable independiente y la constante de ajuste comparado con el nivel de significancia de 0,05. Aquel valor P superior a este indicador puede ser descartado sin degradar significativamente el modelo descrito con las anteriores variables analizadas. En este caso, la variable de cantidad de peatones se puede remover del análisis sin problema alguno en la calidad de la predicción que tendría la ecuación de regresión no lineal descrita.

| <i>Parámetro</i> | <i>Estimació n</i> | <i>Estándar r</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------|----------------|
| CONSTANTE | 9328,29 | 2249,09 | 4,14758 | 0,0016 |
| Ancho derecho | -351,396 | 401,164 | -0,875942 | 0,3998 |
| Ancho izquierdo | 231,681 | 712,267 | 0,325273 | 0,7511 |
| LoS derecha | 619,512 | 761,116 | 0,813953 | 0,4329 |
| LoS izquierda | -1773,75 | 712,246 | -2,49036 | 0,0300 |

Tabla 25 Significancia de variables, ambas secciones.

La tabla 26 presenta el análisis de varianza para el modelo propuesto. Dado que la prueba de valor P es inferior que el nivel de significancia de 0,05 tomado en esta investigación, se considera que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables y el potencial energético con un nivel de confianza del 95%.

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|------------------|------------------------------|-----------|---------------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 4,40828E7 | 4 | 1,10207E7 | 4,90 | 0,0162 |
| Residuo | 2,47215E7 | 11 | 2,24741E6 | | |
| Total (Corr.) | 6,88043E7 | 15 | | | |

Tabla 26 Análisis de varianza, ambas secciones.

9. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Con el fin de determinar las posibilidades de materializar la propuesta de generación de energía en los senderos peatonales mencionados a lo largo del presente escrito, se realizó un estudio de factibilidad económica teniendo en cuenta los diversos costos asociados al proyecto frente al ahorro que sería percibido de llevarse a cabo su implementación.

Se identificaron las actividades básicas que deben ser llevadas a cabo para la adecuación del lugar y posterior instalación de las baldosas piezoeléctricas, las cuales se encuentran clasificadas y tabuladas con su valor unitario y unidad de cobro:

| Actividad | Precio unitario | Unidad |
|--|-----------------|--------|
| Construcción de andén Concreto 2500 PSI | 484.715 | m3 |
| Solado concreto 14 Mpa | 35.664 | m2 |
| Demolición de sardinel (Con retiro) | 4.630,00 | ml |
| Demolición de andén en concreto (Con retiro) | 14.295 | m2 |
| Limpieza general | 4.540 | m2 |

| | | |
|---|--------|----|
| Fundición de sardinell Concreto 2500 PSI | 45.660 | ml |
|---|--------|----|

Tabla 27 Actividades básicas para la ejecución del proyecto.

Adicionalmente se deben tener en cuenta los costos directamente relacionados con las placas piezoeléctricas, donde se tiene el valor de las baldosas, cuyo monto de acuerdo con PAVEGEN equivale a 500 libras esterlinas por metro cuadrado, es decir, un aproximado de 2’418.095 pesos colombianos, el costo de instalación de la baldosa, que se asume ser el 10% del costo de estas, costos de mantenimientos, asumidos como un 5% del valor de las baldosas, personal de monitoreo y el costo de equipos auxiliares, complementarios para el funcionamiento de las baldosas, que se asume ser un 40% de su valor.

Las siguientes tablas muestran los costos totales generales en cada sección de la calle 85, en ambos costados:

| Costos | \$ | | | | | |
|---------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| Cra | Remodelación del andén | Instalación | Equipos auxiliares | Baldosas | Total baldosas | Total general |
| 82 | 14.691.74 | 17.677.000 | 70.708.00 | 2.418.09 | 176.769.9 | 282.264.83 |
| | 5 | | 0 | 5 | 99 | 8 |
| 70 | 28.088.90 | 38.024.544 | 152.098.1 | 2.418.09 | 380.245.4 | 600.875.15 |
| | 5 | | 76 | 5 | 39 | 8 |
| 65 | 16.816.07 | 20.667.458 | 82.669.83 | 2.418.09 | 206.674.5 | 329.246.04 |
| | 8 | | 2 | 5 | 80 | 2 |
| 59B | 22.425.60 | 28.821.274 | 115.285.0 | 2.418.09 | 288.212.7 | 457.162.81 |
| | 2 | | 97 | 5 | 43 | 2 |
| 58 | 20.494.08 | 25.897.797 | 103.591.1 | 2.418.09 | 258.977.9 | 411.379.14 |
| | 8 | | 90 | 5 | 75 | 5 |
| 57 | 17.963.17 | 21.936.958 | 87.747.83 | 2.418.09 | 219.369.5 | 349.435.64 |
| | 8 | | 1 | 5 | 78 | 1 |
| 53 | 35.663.13 | 45.701.996 | 182.807.9 | 2.418.09 | 457.019.9 | 723.611.16 |

| | | | | | | |
|--------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | 8 | | 82 | 5 | 55 | 6 |
| 51B | 25.515.96 | 33.514.797 | 134.059.1 | 2.418.09 | 335.147.9 | 530.656.00 |
| | 1 | | 87 | 5 | 67 | 7 |
| 50 | 28.354.20 | 36.440.692 | 145.762.7 | 2.418.09 | 364.406.9 | 577.382.67 |
| | 9 | | 67 | 5 | 17 | 9 |
| 49C | 41.169.23 | 56.902.612 | 227.610.4 | 2.418.09 | 569.026.1 | 897.126.50 |
| | 1 | | 46 | 5 | 15 | 0 |
| 47 | 47.507.99 | 69.111.573 | 276.446.2 | 2.418.09 | 691.115.7 | 1.086.599.6 |
| | 8 | | 93 | 5 | 32 | 91 |
| 46 | 19.489.71 | 24.374.398 | 97.497.59 | 2.418.09 | 243.743.9 | 387.523.77 |
| | 4 | | 0 | 5 | 76 | 3 |
| 43 | 52.948.47 | 77.236.372 | 308.945.4 | 2.418.09 | 772.363.7 | 1.213.912.1 |
| | 9 | | 90 | 5 | 24 | 60 |
| 42H | 22.042.51 | 27.808.093 | 111.232.3 | 2.418.09 | 278.080.9 | 441.581.99 |
| | 0 | | 70 | 5 | 25 | 3 |
| 42G | 66.325.54 | 84.222.249 | 336.888.9 | 2.418.09 | 842.222.4 | 1.332.077.3 |
| | 9 | | 95 | 5 | 89 | 76 |
| Total | | 608.337.811 | | | | |
| gener | 459.496.3 | | 2.433.351. | 36.271.4 | 6.083.378. | 9.620.834.9 |
| al | 85 | | 245 | 25 | 112 | 78 |

Tabla 28 Total de costos asociados al proyecto, costado izquierdo.

| Suma de Costo asociado | \$ | | | | | |
|------------------------------|--------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|------------------|
| CRA | Baldosa s | Equip os auxilia res | Instalaci ón | Remodel ación del anden | Total baldos as | Total general |
| 82 | 2.418.09 | 71.440.19 | 17.860.0 | 14.806.3 | 178.600.4 | 285.125.2 |
| | 5 | 9 | 50 | 86 | 97 | 26 |
| 70 | 2.418.09 | 153.616.7 | 38.404.1 | 28.326.6 | 384.041.8 | 606.807.5 |
| | 5 | 39 | 85 | 68 | 48 | 35 |
| 65 | 2.418.09 | 101.289.1 | 25.322.2 | 19.731.3 | 253.222.9 | 401.983.7 |
| | 5 | 63 | 91 | 36 | 08 | 94 |
| 59B | 2.418.09 | 387.088.6 | 96.772.1 | 64.982.3 | 967.721.6 | 1.518.982. |
| | 5 | 48 | 62 | 18 | 19 | 842 |
| 58 | 2.418.09 | 328.851.2 | 82.212.8 | 55.763.4 | 822.128.1 | 1.291.373. |
| | 5 | 48 | 12 | 16 | 19 | 689 |
| 57 | 2.418.09 | 96.685.11 | 24.171.2 | 19.362.5 | 241.712.7 | 384.349.7 |
| | 5 | 0 | 78 | 02 | 76 | 62 |
| 53 | 2.418.09 | 185.516.2 | 46.379.0 | 36.087.1 | 463.790.6 | 734.191.2 |
| | 5 | 48 | 62 | 76 | 21 | 02 |

| | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 51B | 2.418.09 | 333.406.9 | 83.351.7 | 56.728.1 | 833.517.3 | 1.309.422. |
| | 5 | 39 | 35 | 57 | 47 | 272 |
| 50 | 2.418.09 | 382.068.6 | 95.517.1 | 65.353.0 | 955.171.7 | 1.500.528. |
| | 5 | 82 | 71 | 04 | 06 | 658 |
| 49C | 2.418.09 | 121.291.6 | 30.322.9 | 24.522.7 | 303.229.1 | 481.784.4 |
| | 5 | 45 | 11 | 27 | 13 | 91 |
| 47 | 2.418.09 | 100.747.5 | 25.186.8 | 19.998.5 | 251.868.7 | 400.219.8 |
| | 5 | 10 | 78 | 59 | 75 | 17 |
| 46 | 2.418.09 | 99.935.03 | 24.983.7 | 19.871.3 | 249.837.5 | 397.045.8 |
| | 5 | 0 | 58 | 47 | 75 | 06 |
| 43 | 2.418.09 | 110.023.3 | 27.505.8 | 21.802.9 | 275.058.3 | 436.808.4 |
| | 5 | 23 | 31 | 18 | 06 | 72 |
| 42H | 2.418.09 | 110.342.5 | 27.585.6 | 21.903.1 | 275.856.2 | 438.105.6 |
| | 5 | 11 | 28 | 83 | 78 | 95 |
| 42G | | | 102.503. | | 1.025.030 | |
| | 2.418.09 | 410.012.1 | 04 | 77.774.5 | .47 | 1.617.738. |
| | 5 | 88 | 7 | 64 | 1 | 365 |
| 42B1 | 2.418.09 | 268.118.3 | 67.029.5 | 53.043.5 | 670.295.9 | 1.060.905. |
| | 5 | 74 | 93 | 22 | 34 | 518 |
| Total general | 38.689.5 | 3.260.433. | 815.108. | 600.057. | 8.151.083 | 12.865.37 |
| | 20 | 557 | 38 | 785 | .89 | 3.14 |
| | | | 9 | | 3 | 4 |

Tabla 29 Total de costos asociados al proyecto, costado derecho.

Además, los costos de mantenimiento y compra de equipos:

| CRA | Costo de mantenimiento | Costo compra de equipos |
|-----|------------------------|-------------------------|
| 82 | \$ 8.838.50 | \$ 26.515.50 |
| | 0 | 0 |
| 70 | \$ 19.012.27 | \$ 57.036.81 |
| | 2 | 6 |
| 65 | \$ 10.333.72 | \$ 31.001.18 |
| | 9 | 7 |
| 59B | \$ 14.410.63 | \$ 43.231.91 |
| | 7 | 1 |
| 58 | \$ 12.948.89 | \$ 38.846.69 |
| | 9 | 6 |
| 57 | \$ 10.968.47 | \$ 32.905.43 |
| | 9 | 7 |
| 53 | \$ | \$ |

| | | | |
|------|----|-----------|------------|
| | | 22.850.99 | 68.552.99 |
| | 8 | | 3 |
| 51B | \$ | | \$ |
| | | 16.757.39 | 50.272.19 |
| | 8 | | 5 |
| a 50 | \$ | | \$ |
| | | 18.220.34 | 54.661.03 |
| | 6 | | 7 |
| 49C | \$ | | \$ |
| | | 28.451.30 | 85.353.91 |
| | 6 | | 7 |
| a 47 | \$ | | \$ |
| | | 34.555.78 | 103.667.36 |
| | 7 | | 0 |
| 46 | \$ | | \$ |
| | | 12.187.19 | 36.561.59 |
| | 9 | | 6 |
| 43 | \$ | | \$ |
| | | 38.618.18 | 115.854.55 |
| | 6 | | 9 |
| 42H | \$ | | \$ |
| | | 13.904.04 | 41.712.13 |
| | 6 | | 9 |
| 42G | \$ | | \$ |
| | | 42.111.12 | 126.333.37 |

| | | |
|----------------|------------------|-------------------|
| | 4 | 3 |
| Total | \$ | \$ |
| general | 42.111.12 | 126.333.37 |
| | 4 | 3 |

Tabla 30 Mantenimiento y compra de equipos, costado izquierdo.

| CRA | Costo de Mantenimiento | Costo Compra de equipos |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 82 | \$ | \$ |
| | 8.930.02 | 26.790.07 |
| | 5 | 5 |
| 70 | \$ | \$ |
| | 19.202.09 | 57.606.27 |
| | 2 | 7 |
| 65 | \$ | \$ |
| | 12.661.14 | 37.983.43 |
| | 5 | 6 |
| 59B | \$ | \$ |
| | 48.386.08 | 145.158.24 |
| | 1 | 3 |
| 58 | \$ | \$ |
| | 41.106.40 | 123.319.21 |
| | 6 | 8 |

| | | | |
|------|----|-----------|------------|
| 57 | \$ | | \$ |
| | | 12.085.63 | 36.256.91 |
| | 9 | | 6 |
| 53 | \$ | | \$ |
| | | 23.189.53 | 69.568.59 |
| | 1 | | 3 |
| 51B | \$ | | \$ |
| | | 41.675.86 | 125.027.60 |
| | 7 | | 2 |
| 50 | \$ | | \$ |
| | | 47.758.58 | 143.275.75 |
| | 5 | | 6 |
| 49C | \$ | | \$ |
| | | 15.161.45 | 45.484.36 |
| | 6 | | 7 |
| 47 | \$ | | \$ |
| | | 12.593.43 | 37.780.31 |
| | 9 | | 6 |
| C 46 | \$ | | \$ |
| | | 12.491.87 | 37.475.63 |
| | 9 | | 6 |
| 43 | \$ | | \$ |
| | | 13.752.91 | 41.258.74 |
| | 5 | | 6 |
| 42H | \$ | | \$ |

| | | | |
|----------------|-----------|------------------|-------------------|
| | | 13.792.81 | 41.378.44 |
| | 4 | | 2 |
| 42G | \$ | | \$ |
| | | 51.251.52 | 153.754.57 |
| | 4 | | 1 |
| 42B1 | \$ | | \$ |
| | | 33.514.79 | 100.544.39 |
| | 7 | | 0 |
| Total | \$ | | \$ |
| general | | 51.251.52 | 153.754.57 |
| | 4 | | 1 |

Tabla 31 Mantenimiento y compra de equipos, costado derecho.

Así como el potencial energético producido y el ahorro potencial percibido:

| CRA | Energía producida | Valor Kwh | Ahorro potencial percibido |
|------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 82 | 1.884,19 | 517 | \$ 974.126,2 |
| 70 | 797,49 | 517 | \$ 412.302,3 |
| 65 | 2.143,25 | 517 | \$ 1.108.060,3 |
| 59B | 2.392,46 | 517 | \$ 1.236.901,8 |
| 58 | 2.342,62 | 517 | \$ 1.211.134,5 |
| 57 | 2.342,62 | 517 | \$ 1.211.134,5 |
| 53 | 3.887,75 | 517 | \$ 2.009.966,8 |
| 51B | 847,33 | 517 | \$ 438.069,6 |
| 50 | 1.096,55 | 517 | \$ 566.916,4 |
| 49C | 2.791,21 | 517 | \$ 1.443.055,6 |
| 47 | 996,86 | 517 | \$ 515.376,6 |
| 46 | 2.292,78 | 517 | \$ 1.185.367,3 |
| 43 | 647,96 | 517 | \$ 334.995,3 |
| 42H | 2.541,99 | 517 | \$ 1.314.208,8 |

| | | | |
|--------------------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| 42G | 7.476,45 | 517 | \$ 3.865.324,7 |
| Total general | 7.476,45 | \$ 517 | \$ 3.865.324,7 |

Tabla 32 Potencial energético y ahorro percibido, costado izquierdo.

| CRA | Energía Producida | Valor kwh | Ahorro potencial percibido |
|------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 82 | 1.594,98 | 517 | \$ 824.605 |
| 70 | 847,33 | 517 | \$ 438.070 |
| 65 | 2.143,29 | 517 | \$ 1.108.081 |
| 59B | 1.495,29 | 517 | \$ 773.065 |
| 58 | 1.445,45 | 517 | \$ 747.298 |
| 57 | 2.342,62 | 517 | \$ 1.211.135 |
| 53 | 3.887,75 | 517 | \$ 2.009.967 |
| 51B | 647,96 | 517 | \$ 334.995 |
| 50 | 2.641,68 | 517 | \$ 1.365.749 |
| 49C | 3.040,42 | 517 | \$ 1.571.897 |
| 47 | 2.342,62 | 517 | \$ 1.211.135 |
| 46 | 2.292,78 | 517 | \$ 1.185.367 |
| 43 | 2.492,15 | 517 | \$ 1.288.442 |
| 42H | 2.541,99 | 517 | \$ 1.314.209 |
| 42G | 2.541,99 | 517 | \$ 1.314.209 |
| 42B1 | 6.080,84 | 517 | \$ 3.143.794 |

| | | | |
|----------------|-----------------|---------------|---------------------|
| Total | | \$ 517 | \$ 3.143.794 |
| general | 6.080,84 | | |

Tabla 33 Potencial energético y ahorro percibido, costado derecho.

Con base a los anteriores datos se realizó la proyección de costos totales necesarios para la ejecución del proyecto desde el año inicial hasta el término de la vida útil de las baldosas piezoeléctricas y los ahorros potenciales percibidos en cada sección del tramo de estudio, afectando los valores anualmente por el costo de inflación, tasado en 3,8% para el año 2019.

| CRA | Año inicial | | Termino de vida útil | |
|-----|----------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | Costos totales (-\$) | Ahorro (\$) | Costos totales (- \$) | Ahorro (\$) |
| 82 | - 337.562.242,52 | 974.126,23 | - 68.747.188, 75 | 1.011.143,03 |
| 70 | - 686.693.878,44 | 412.302,33 | - 128.396.366, 87 | 496.823,99 |
| 65 | - 389.029.134,16 | 1.108.060,25 | - 197.517.084, 00 | 3.033.136,26 |
| 59B | - 529.176.628,01 | 1.236.901,82 | - 148.866.638, 20 | 2.084.962,16 |
| 58 | - 479.007.746,13 | 1.211.134,54 | - 124.376.481, 73 | 1.825.421,99 |
| 57 | - 411.122.982,60 | 1.211.134,54 | - 121.262.228, 03 | 1.966.789,97 |
| 53 | - 820.946.063,75 | 2.009.966,75 | - | 2.514.044,69 |

| | | | | |
|-----|------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | | | 152.305.400, 75 | |
| 51B | 609.710.106,75 | 438.069,61 | 113.321.150, 17 | 508.548,69 |
| 50 | 660.825.621,63 | 566.916,35 | 120.052.235, 27 | 658.125,01 |
| 49C | 1.011.262.321,85 | 1.443.055,57 | 161.007.059, 69 | 1.613.894,41 |
| 47 | 1.219.048.955,74 | 515.376,62 | 202.630.378, 15 | 621.028,43 |
| 46 | 452.867.274,00 | 1.185.367,26 | 99.441.037, 75 | 1.482.644,56 |
| 43 | 1.358.548.623,74 | 334.995,32 | 288.268.307, 03 | 524.091,34 |
| 42H | 512.076.036,25 | 1.314.208,83 | 120.732.189, 44 | 1.838.402,33 |
| 42G | 1.487.192.654,63 | 3.865.324,65 | | 5.018.425,15 |

| | | | | |
|--|--|--|--------------------|--|
| | | | 257.200.740, 22 | |
|--|--|--|--------------------|--|

Tabla 34 Amortización de costos a vida útil, costado izquierdo.

| CRA | Año inicial | | Termino de vida útil | |
|-----|----------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | Costos totales (-\$) | Ahorro (\$) | Costos totales (- \$) | Ahorro (\$) |
| 82 | - 340.697.205,68 | 824.604,66 | - 71.750.423, 61 | 888.465,34 |
| 70 | - 693.195.717,48 | 438.069,61 | - 120.008.953, 79 | 489.931,30 |
| 65 | - 468.749.135,10 | 1.108.080,93 | - 258.607.647, 00 | 3.521.189,84 |
| 59B | - 1.692.922.989,75 | 773.064,93 | - 487.973.942, 43 | 1.691.844,31 |
| 58 | - 1.443.474.812,01 | 747.297,65 | - 352.557.250, 34 | 1.357.223,19 |

| | | | | |
|-----|--------------------|--------------|------------------|--------------|
| 57 | - 449.388.583,05 | 1.211.134,54 | - 149.118.703,02 | 2.283.218,10 |
| 53 | - 832.541.700,25 | 2.009.966,75 | - 148.346.468,69 | 2.422.008,38 |
| 51B | - 1.463.231.779,13 | 334.995,32 | - 245.627.184,41 | 419.008,53 |
| 50 | - 1.672.586.319,24 | 1.365.748,56 | - 237.561.267,87 | 1.471.517,59 |
| 49C | - 556.050.763,25 | 1.571.897,14 | - 102.098.408,71 | 1.757.989,13 |
| 47 | - 466.782.037,80 | 1.211.134,54 | - 90.715.405,19 | 1.354.516,97 |
| 46 | - 463.303.346,85 | 1.185.367,26 | - 104.787.603,15 | 1.538.985,05 |
| 43 | - 506.849.122,81 | 1.288.441,55 | - 111.276.577,84 | 1.672.808,38 |

| | | | | |
|----------|---------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| 42H | - 1.800.274.840,13 | 1.314.208,83 | - 243.234.367, 78 | 1.364.148,77 |
| 42G | - 508.266.041,40 | 1.314.208,83 | - 96.031.760,8 8 | 1.469.793,90 |
| 42B 1 | - 119023181 4 | 3143794,28 | - 190422670, 5 | 3649585,425 |

Tabla 35 Amortización de costos a vida útil, costado derecho.

Posteriormente, con la ayuda de Microsoft Excel se llevó a cabo el análisis de valor presente neto (VPN) tanto para los costos totales como para el ahorro percibido, con el fin de determinar si al término de la vida útil de las baldosas ya se presentaba o no un margen de ganancias. Para la financiación, se hizo uso del crédito de libre inversión de la entidad bancaria BBVA, tasado con un interés de 27,8%, convertido a porcentaje de tasa de descuento de la siguiente manera:

$$\frac{T_{interes}}{s} * 100\%$$
$$T_{descuento} = \frac{1}{1 + T_{interes}}$$

Teniendo entonces:

0,278

$$T_{descuento} = \frac{1}{1 + 0,278} * 100\%$$
$$\Rightarrow T_{descuento} \approx 21\%$$

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| CRA | VPN | VPN | VPN |
|-----|-----|-----|-----|

| | INVERSIÓN (- \$) | AHORRO (\$) | TIEMPO HORIZON TE |
|-----|---------------------------|----------------|--------------------------|
| 82 | - 394.256.352, 72 | 1.807.990,93 | -\$ 392.448.36 2 |
| 70 | - 1.029.004.079, 70 | 1.736.856,31 | -\$ 1.027.267.22 3 |
| 65 | - 811.557.620, 24 | 7.596.544,41 | -\$ 803.961.07 6 |
| 59B | - 994.660.754, 79 | 7.756.272,47 | -\$ 986.904.48 2 |
| 58 | - 880.886.909, 55 | 7.109.348,20 | -\$ 873.777.56 1 |
| 57 | - 796.230.570, 71 | 7.457.314,86 | -\$ 788.773.25 6 |
| 53 | - 1.260.042.223, 74 | 9.257.952,48 | -\$ 1.250.784.27 1 |
| 51B | - | 1.644.056,15 | -\$ |

| | | | |
|------|---------------------------|---------------|--------------------------|
| | 878.443.041, 78 | | 876.798.98 6 |
| a 50 | - 945.520.839, 54 | 2.127.612,35 | -\$ 943.393.22 7 |
| 49C | - 1.330.288.913, 49 | 4.640.898,15 | -\$ 1.325.648.01 5 |
| 47 | - 1.759.270.203, 55 | 2.171.064,95 | -\$ 1.757.099.13 9 |
| 46 | - 739.555.583, 20 | 5.459.828,51 | -\$ 734.095.75 5 |
| 43 | - 2.284.410.932, 24 | 2.018.275,81 | -\$ 2.282.392.65 6 |
| 42H | - 898.551.063, 97 | 7.199.106,60 | -\$ 891.351.95 7 |
| 42G | - 2.268.275.621, 70 | 19.105.585,63 | -\$ 2.249.170.03 6 |

Tabla 36 Valor presente neto del proyecto, costado izquierdo.

| CRA | VPN INVERSIÓN (- \$) | VPN AHORRO (\$) | VPN TIEMPO HORIZON TE |
|-----|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 82 | - 446.498.535, 61 | 2.134.712, 81 | -\$ 444.363.82 3 |
| 70 | - 930.986.827, 80 | 1.408.841, 41 | -\$ 929.577.98 6 |
| 65 | - 948.660.813, 80 | 7.642.536, 29 | -\$ 941.018.2 78 |
| 59B | - 2.967.872.704, 19 | 5.193.416, 58 | -\$ 2.962.679.2 88 |
| 58 | - 2.501.615.286, 77 | 4.820.771, 66 | -\$ 2.496.794.5 15 |
| 57 | - 886.186.346, 40 | 7.899.125, 66 | -\$ 878.287.22 1 |
| 53 | - 1.228.039.725, | 8.467.144, 59 | -\$ 1.219.572.5 |

| | | | |
|-----|---------------------------|------------------|--------------------------|
| | 55 | | 81 |
| 51B | - 2.171.374.451, 23 | 1.542.996, 05 | -\$ 2.169.831.4 55 |
| 50 | - 2.022.888.057, 06 | 3.535.610, 57 | -\$ 2.019.352.4 46 |
| 49C | - 758.353.118, 21 | 5.055.255, 45 | -\$ 753.297.86 3 |
| 47 | - 646.529.600, 30 | 3.895.035, 07 | -\$ 642.634.56 5 |
| 46 | - 781.528.760, 63 | 5.859.051, 37 | -\$ 775.669.70 9 |
| 43 | - 844.780.652, 53 | 6.368.528, 54 | -\$ 838.412.12 4 |
| 42H | - 2.000.864.221, 35 | 2.439.188, 66 | -\$ 1.998.425.0 33 |
| 42G | - 698.547.668, 93 | 4.226.524, 23 | -\$ 694.321.14 5 |

| | | | |
|-----|--------------|------------|-----------------|
| 42B | - | 11.798.523 | -\$ |
| 1 | 1.641.805.44 | | 1.630.006.920,5 |
| | 3 | | 1 |

*Tabla 37 Tabla 36 Valor presente neto del proyecto, costado
derecho.*

10. Análisis Ambiental

El cálculo de reducción de dióxido de carbono se realiza tomando como referencia el factor de emisión de Co_2 , el cual para energía eléctrica es de $0,16438\text{ Kg}Co_2eq/Kwh$.

$$Reducción\ CO_2 = \frac{Energía\ producida\ [Kwh] \times 0,16438\ KgCo_2eq}{año \times anden} \times Kwh$$

Los resultados obtenidos se tabularon de la siguiente manera:

| CRA | ENERGÍA | |
|-----|--------------------|------------------|
| | A | |
| | TOTAL (Kwh/año) | Reducción Co2 |
| 82 | 3439,17 | 565,33 |
| 70 | 1644,82 | 270,38 |
| 65 | 4286,50 | 704,61 |
| 59B | 3887,75 | 639,07 |
| 58 | 3788,07 | 622,68 |
| 57 | 4685,24 | 770,16 |
| 53 | 7775,50 | 1.278,14 |

| | | |
|-----|--------------|----------|
| 51B | 1495,29 | 245,80 |
| 50 | 3738,22 | 614,49 |
| 49C | 5831,63 | 958,60 |
| 47 | 3339,48 | 548,94 |
| 46 | 4585,55 | 753,77 |
| 43 | 3140,11 | 516,17 |
| 42H | 5083,98 | 835,71 |
| 42G | 10018,4 4 | 1.646,83 |
| 42B | 6080,84 | 999,57 |
| 1 | | |

Tabla 38 Reducción de Co2 por efecto piezoeléctrico.

11. Conclusiones

A partir de los datos expuestos y los resultados obtenidos anteriormente, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- La predicción del potencial energético corresponde a un análisis multivariable, y contrario a lo esperado, no se rige bajo una tendencia lineal. La capacidad de los modelos para replicar los resultados estará relacionada con los coeficientes de determinación los cuales, para el costado izquierdo, derecho y ambos costados fueron de 52,4286, 36,5703 y 55,5002 respectivamente.
- Debido a la dificultad para predecir el comportamiento de los peatones sobre los andenes, debido a las distintas condiciones de flujo, movimientos y comportamiento único de cada peatón sobre el tramo, y por tanto la asunción de que cada placa recibe el total de las pisadas presentes en el sendero, los resultados de potencial energético pueden ser sobrestimados.
- La reposición de baldosas en el tiempo es variada, sin embargo, serán puntos críticos el costado izquierdo de la carrera 82 cada 1,6 años y el costado derecho de la carrera 42G cada 1,72 años. De igual forma es importante tener conocimiento de los tiempos más prolongados para la reposición de baldosas, que en el presente caso se encuentra en la Carrera 65 para sus costados izquierdo y derecho, con tiempos de 27,26 y 31,45 años respectivamente, ya que los tiempos de reposición serán determinantes en el análisis de factibilidad económica.
- De la tabla 13 observamos que destacan por su capacidad de generación de energía las carreras 53, 49C, 42G, 42H y 42B1, con potenciales (Kwh/año) de 7775,5,

5831,63, 5083,98, 10018,44 y 6080,84 respectivamente, siendo estas las secciones más factibles para la posible implementación del proyecto.

- A pesar de los resultados de los análisis de varianza de los modelos, los cuales apuntan a la confiabilidad de estos y por tanto a la relación estadística significativa entre las variables, los valores de r cuadrada ajustado son relativamente bajos, siendo el más alto apenas de 55,5002%, lo que bien puede ser indicativo de la necesidad de tomar una muestra mayor de datos.
- A partir de la superficie de respuesta obtenida para el costado derecho, se puede observar que la constante independiente del modelo posee una mayor incidencia en la determinación del potencial energético, por tanto, entre mayores anchos y niveles de servicio presente el andén, contrario a lo esperado, su capacidad de generación de potencial energético será menor.
- El análisis de factibilidad económica evidencia que la aplicación del proyecto de generación de energía no resulta viable en ninguna sección de la calle 85, puesto que los requerimientos en costos son considerablemente más altos que el ahorro generado por las baldosas. Se evidencia en las tablas 36 y 37 que el valor presente neto en cada sección al término de su vida útil corresponde a una cifra negativa, lo que indica que el proyecto se encuentra lejos de su punto de equilibrio y generará pérdidas considerables.
- En términos ambientales y de haber resultado viable la implementación del proyecto de generación de energía piezoeléctrica en los andenes de la calle 85, la reducción de la externalidad de contaminación y emisiones de CO_2 por quema de combustibles fósiles ligados al funcionamiento de los diversos elementos del sistema vial habría

reflejado un decrecimiento considerable, en el peor de los casos de 245,80 Kg de CO₂ equivalente en la Carrera 51B, y los casos más positivos se localizaron en las carreras 53 y 42G con reducciones de emisión de 1.278,14 y 1.646,83 de KgCO_{2eq} respectivamente.

- Con base a los resultados de análisis de varianza obtenidos y la fuerte relación entre las variables de los modelos propuestos, es posible afirmar que estos no son solo aplicables al tramo de estudio, sino que pueden ser llevados a un mayor contexto, entendiéndose ser aplicados sobre los senderos peatonales de las principales ciudades del País.

12. Referencias

- ALOMA, M. (2007). Análisis de los conceptos de energía, calor, trabajo y el teorema de Carnot. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 25(3), 387–400.
- AutoCAD (No. 2018). (2018).
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school - Empirical results from the Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19(2), 59–66.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/19/2/306>
- Ertruk, A., I. D. (2011). *Piezoelectric Energy Harvesting* (1 Edición). Wiley.
- Fransisco, E. (2010). *Principios de Piezoelectricidad*. 28, 1–11.
- Hcm, I., & Results, T. research B. (2016). *Highway capacity manual* (2016th ed.). National Research Council.
- Hervas, E. (n.d.). *La energía*.
- IICA. (2014). Uso y acceso a las energías renovables en territorios rurales. *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*, 50. <https://www.iica.int/es/publications/uso-y-acceso-las-energias-renovables-en-territorios-rurales-guía-metodológica%0Ahttp://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-energia-renovable-y-eficiencia-energetica/>
- Merino Luis. (2003). Las energías Renovables. *Haya Comunicación*, 20.
http://www.concursol.santafe-conicet.gob.ar/materiales/4_energias_renovable_iberdrola.pdf

Planeta, O. C. el. (2018). *No Title*. ¿Qué Son Las Energías Renovables?

<https://cuidemoselplaneta.org/energias-renovables/>

Statgraphics. (2020). *No Title* (15.2.05).

Tippens, P. E. (2007). *Digitalizado* (7 edición). Mc Graw Hill.

Wang, S., Wang, C., Yu, G., & Gao, Z. (2020). Development and performance of a piezoelectric energy conversion structure applied in pavement. *Energy Conversion and Management*, 207(January), 112571. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112571>

Young, F. (2018). Ondas electromagnéticas. In Y. and Freedman (Ed.), *Sears-Zemansky Física Universitaria con Física Moderna* (12 edición).
<https://doi.org/10.2307/j.ctvv8f6.8>