

**CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA
PALMA DE ACEITE PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EN VÍAS
TERCIARIAS**

ADRIANA PATRICIA JAIMES BARRIOS

KAREN DAYANA MÁRQUEZ TINOCO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

VALLEDUPAR/CESAR

MAYO, 2022

**CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA
PALMA DE ACEITE PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EN VÍAS
TERCIARIAS**

KAREN DAYANA MÁRQUEZ TINOCO

ADRIANA PATRICIA JAIMES BARRIOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Magister en Gestión Ambiental

Director de la tesis:

YOLANDA ACENETH JIMÉNEZ FUENTES

Codirector:

JOSE LUIS CONSUEGRA GONZÁLEZ

Línea de investigación:

Materiales y desarrollo sostenible

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

VALLEDUPAR/CESAR

MAYO, 2022

AGRADECIMIENTOS

Adriana Patricia Jaimes Barrios

Primeramente, agradecer a Dios por acompañarme en todo el proceso de maestría, sin su dirección nada hubiera sido posible; agradezco los consejos, el amor, el apoyo y las palabras de aliento de mi esposo, de mis padres y mis hermanos, quienes estuvieron para mí cuando más los necesitaba; así mismo doy gracias a mi colega de tesis por su excelente trabajo y empeño para el desarrollo de la misma. Este logro se lo dedico a mi hija, quien me enseñó que todo lo que le pedimos a Dios, si es su voluntad, a su tiempo llegará.

Karen Dayana Márquez Tinoco

En primera instancia, quiero dar infinitas gracias a Dios por permitirme estar con salud y acompañarme en cada proceso de mi vida, a mis padres y hermanas por brindarme su apoyo y amor incondicional para poder culminar con éxito este trabajo de grado. Así mismo, a mi colega, tutores de tesis y todas aquellas personas que aportaron sus conocimientos en pro del proyecto.

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta la importancia del impacto ambiental para alternativas de mezclas de residuos procedentes de la agroindustria de la palma de aceite “cuesco” para el mejoramiento de suelos en vías terciarias y la aplicación del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (AEMO).

Inicialmente, se realizó la caracterización del suelo de la vía en afirmado ubicada en el tramo vial localizado en el Km 11 sur de Codazzi - Vía Bucaramanga. La distribución granulométrica de estos apiques de suelos mostró un alto porcentaje de gravas y bajo contenido de finos. El índice de plasticidad estuvo por debajo del 1% y una capacidad portante alta (>60%). Según la norma INVÍAS para afirmados se obtiene que los apiques no son viables para la implementación de vías terciarias, pues su distribución de granulométrica no coincide con los requisitos mínimos establecidos en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). Así mismo se realizó la caracterización del residuo de cuesco, cuya muestra fue facilitada por La empresa Extractora y Palmas Sicarare localizada sur de Codazzi, cuyos datos arrojados por la granulométrica muestran un alto porcentaje de arenas (mayor al 50%) y bajo porcentaje de fino (menor al 10%). Con una índice plasticidad No plástico. Evidenciando que este material no cumple con los requisitos establecidos en las especificaciones del INVÍAS.

Para mejorar las características mecánicas y físicas del material para afirmado, se utilizó un Algoritmo Evolutivo Multivariable, con el fin de identificar la mezcla óptima que acompañaría al cuesco. Para llevar a cabo el AEMO se establecieron dos funciones objetivos para incrementar el CBR y disminuir los costos, partiendo de unas restricciones asociadas a la granulometría, límites de consistencia del suelo y el impacto ambiental que genere la producción de los aditivos.

Finalmente se propone una mezcla de muestras de suelo de la vía en estudio con el residuo de la palma de aceite (cuesco), donde se determina que la mezcla óptima es de 20/80, es decir combinar 20% de suelo y 80% de cuesco, con una adición de 3.256% de cal y 0.10% de cemento. Esta combinación alcanza un CBR de 38,96%, un índice de plasticidad de 8,83% y un impacto ambiental medio.

ABSTRACT

This research work presents the importance of the environmental impact for alternatives of mixtures of residues from the "cuesco" oil palm agroindustry for the improvement of soils in tertiary roads and the application of the Multi-Objective Evolutionary Algorithm (AEMO).

Initially, the characterization of the soil of the unpaved road located in the road section located at Km 11 south of Codazzi - Vía Bucaramanga was carried out. The granulometric distribution of these soil apexes showed a high percentage of gravel and a low content of fines. The plasticity index was below 1% and the bearing capacity was high (>60%). According to the INVÍAS standard for pavements, it is obtained that the apexes are not viable for the implementation of tertiary roads, since their granulometric distribution does not coincide with the minimum requirements established in the specifications of the National Institute of Roads (INVÍAS). Likewise, the characterization of the shell residue was carried out, whose sample was provided by the Extractora y Palmas Sicarare company located south of Codazzi, whose data from the granulometric analysis show a high percentage of sand (greater than 50%) and a low percentage of fine (less than 10%). With a non-plastic plasticity index. Showing that this material does not meet the requirements established in the INVÍAS specifications.

To improve the mechanical and physical characteristics of the material for hardening, a Multivariable Evolutionary Algorithm was used, in order to identify the optimal mixture that would accompany the shell. To carry out the AEMO, two objective functions were established to increase the CBR and reduce costs, based on restrictions associated with granulometry, soil consistency limits and the environmental impact generated by the production of additives.

Finally, a mixture of soil samples from the road under study with the residue of the oil palm (stone) is proposed, where it is determined that the optimal mixture is 20/80, that is, to combine

20% of soil and 80% of cuesco, with an addition of 3.256% lime and 0.10% cement. This combination reaches a CBR of 38.96%, a plasticity index of 8.83% and a medium environmental impact.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. OBJETIVOS	23
4.1 Objetivo general	23
4.2 Objetivos específicos	23
5. MARCO DE REFERENCIA	24
5.1 Estado del arte	24
5.1.1 Empleo de residuos de palma de aceite (cuesco) en diversos países	24
5.1.2 Aprovechamiento de los residuos de palma de aceite (cuesco) según distintos autores	25
5.1.3 Mejoramiento de suelo con residuos de palma de aceite (cuesco)	29
5.1.4 Aplicaciones de los residuos de palma de aceite (cuesco) en Ingeniería Civil.....	32
6. MARCO TEÓRICO.....	35
6.1 Descripción general de la empresa Extractora y Palmas Sicarare SAS.....	35
6.2 Descripción general de la vía de estudio.....	35
6.3 Geología de la zona de estudio.....	36
6.3.1 Unidad Metasedimentaria de La Virgen (PZmv).....	36
6.3.2 Formación La Quinta (T3Jq).	36
6.3.3 Formación Río Negro (K1r).....	37
6.3.4 Grupo Cogollo (K1K2cg).	37
6.3.5 Formación La Luna (K2l).	38
6.3.6 Formación Cuesta (N1N2c).	38

6.3.7 Abanicos Aluviales (Q2ab).....	38
6.3.8 Depósitos aluviales (Q2al).....	38
6.3.9 Depósitos de planicies aluviales (Q2pa).....	39
6.3.10 Relleno antrópico (Q2ra).....	39
6.4 Los desechos de cuesco proveniente de la palma de aceite.....	39
6.5 Ventajas de residuos de cuesco.....	39
6.6 Desventaja de residuos de cuesco.....	40
6.7 Vías terciarias.....	40
6.8 Mejoramiento de suelo.....	41
6.9 Análisis Multiobjetivo.....	42
6.10 Definición de Algoritmos Evolutivos.....	42
6.10.1 Función objetivo.....	43
6.10.2 Población.....	43
6.10.3 Función de evaluación (Fitness).....	43
6.10.4 Restricción.....	43
6.10.5 Operadores Genéticos.....	43
6.11 Etapas del proceso de un Algoritmo Evolutivo de Métodos de Optimización (AEMO).....	45
6.12 Frente Óptimo de Pareto.....	46
6.13 Ventajas de los AEMO.....	46
6.14 Desventajas de los AEMO.....	47
7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	48
7.1 Revisión y análisis del estado del arte.....	48

7.2 Población de la investigación.....	48
7.3 Zona de almacenamiento de los desechos de cuesco y muestra de suelos.....	48
7.4 Toma de muestras de suelo y residuos de cuesco	49
7.5 Metodología para la caracterización del suelo	51
7.5.1 Humedad	52
7.5.2 Granulometría	52
7.5.3 Límites de Consistencia del suelo.....	53
7.5.4 Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles	56
7.5.5 Ensayo Proctor modificado.....	56
7.5.6 Índice de soporte de California CBR.....	57
7.6 Metodología para la caracterización del cuesco.....	58
7.6.1 Humedad	59
7.6.2 Granulometría	60
7.6.3 Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles	61
7.6.4 Índice de aplanamiento y alargamiento de la partícula de cuesco	62
7.7 Metodología de aplicación del AEMO	63
7.7.1 Función objetivo y Restricciones del Problema de Optimización.....	63
7.7.2 Población inicial y tamaño de la población	68
7.7.3 Generación de las fracciones de cal y cemento	68
7.7.4 Funciones de penalización para IP.....	69
7.7.5 Elitismo.....	69
7.7.6 Operadores Genéticos	69
7.7.7 Evaluación de las restricciones	69

7.7.8 Criterio de parada.....	70
7.8 Metodología para la identificación y estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.....	70
7.8.1 Identificación de los impactos ambientales en la producción del cuesco.....	70
7.8.2 Identificación de los impactos ambientales en la producción de cal.	73
7.8.3 Identificación de los impactos ambientales en la producción de cemento.	75
7.8.4 Estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.	78
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
8.1 Resultados de la caracterización del suelo.....	79
8.2 Resultados de la caracterización del cuesco.....	82
8.3 Resultados del problema de optimización multiobjetivo.....	84
8.3.1 Restricción por ajuste granulométrico.	85
8.3.2 Restricciones por IP.....	86
8.3.3 Desarrollo de la Curva de Pareto para afirmado.....	87
8.4 Resultados de la identificación y estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.....	89
8.4.1 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción del cuesco.	90
8.4.2 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción de cal.	92
8.4.3 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción de cemento.	94
8.4.4 Resultados de la estandarización de los impactos ambientales en el AEMO para la optimización de las mezclas propuestas.....	96

9. CONCLUSIONES	102
10. BIBLOGRAFÍA.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Límite inferior y superior granulométrico para afirmado.</i>	64
Tabla 2. <i>Valoración del CBR para aditivos porcentuales de cal.</i>	65
Tabla 3. <i>Valoración del CBR para aditivos porcentuales de cemento.</i>	66
Tabla 4. <i>Valores de índices de consistencia para aditivos porcentuales de cal.</i>	66
Tabla 5. <i>Valores de índices de consistencia para aditivos porcentuales de cemento.</i>	67
Tabla 6. <i>Costos unitarios de los aditivos y el material seleccionado.</i>	68
Tabla 7. <i>Valores de IP para Afirmado.</i>	69
Tabla 8. <i>Valores de CBR e IP para Afirmado.</i>	69
Tabla 9. <i>Presencia del impacto ambiental.</i>	73
Tabla 10. <i>Desarrollo del impacto.</i>	74
Tabla 11. <i>Duración del impacto.</i>	74
Tabla 12. <i>Magnitud del impacto.</i>	74
Tabla 13. <i>Rangos de calificación de la matriz ecológica.</i>	74
Tabla 14. <i>Escala de Comparación para la Valoración de los Impactos por el Método RIAM.</i> ..	78
Tabla 15. <i>Distribución granulométrica de los apiques de suelo.</i>	79
Tabla 16. <i>Límite inferior y superior granulométrico para afirmado.</i>	80
Tabla 17. <i>Resultados de Límites de consistencia del suelo.</i>	81
Tabla 18. <i>Resultados de desgaste en la máquina de los Ángeles.</i>	81
Tabla 19. <i>Resultados de Densidad seca máxima, humedad óptima y %CBR compactado al 100% y 95%.</i>	82
Tabla 20. <i>Distribución granulométrica del cuesco.</i>	83
Tabla 21. <i>Resultados de desgaste del cuesco en la máquina de los Ángeles.</i>	84

Tabla 22. <i>Resultados de índice de aplanamiento y alargamiento del cuesco.</i>	84
Tabla 23. <i>Resultados de la evaluación multiobjetivo para granulometría – afirmado.</i>	85
Tabla 24. <i>Resultados de la evaluación multiobjetivo para material de afirmado.</i>	88
Tabla 25. <i>Importancia de los impactos ambientales.</i>	91
Tabla 26. <i>Datos de salida del AEMO.</i>	96
Tabla 27. <i>Valores del impacto de la cal y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.</i>	98
Tabla 28. <i>Valores del impacto del cemento y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.</i>	98
Tabla 29. <i>Valores del impacto de la cal y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.</i>	98
Tabla 30. <i>Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por la cal.</i>	99
Tabla 31. <i>Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por el cemento.</i>	99
Tabla 32. <i>Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por el cuesco.</i>	99
Tabla 33. <i>Estandarización de los impactos ambientales en el AEMO.</i>	99
Tabla 34. <i>Resultados de la evaluación multiobjetivo para material de afirmado con su impacto ambiental asociado.</i>	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general de la Extractora y Palmas Sicarare S.A.S	35
Figura 2. Localización general vía de estudio	36
Figura 3. vía en afirmado y planta extractora de aceite	49
Figura 4. Ubicación general de toma muestra de suelos y residuos de cuesco.....	50
Figura 5. Toma de muestras del suelo	50
Figura 6. Cuarteo manual en muestra de agregado.....	52
Figura 7. Serie de tamices para análisis granulométrico	53
Figura 8. Límites de Atterberg.....	53
Figura 9. Equipos y elementos para determinación del límite líquido y plástico	55
Figura 10. Máquina de los Ángeles para determinación de la Resistencia al Desgaste	56
Figura 11. Curva humedad – Densidad seca máxima.....	57
Figura 12. <i>Ensayo Proctor modificado para la determinación de humedad óptima y densidad</i>	58
Figura 13. Máquina HM 3000 para la determinación del CBR.....	58
Figura 14. Cuarteo manual en residuos de cuesco.....	59
Figura 15. <i>Humedad del cuesco</i>	60
Figura 16. Granulometría del cuesco.....	61
Figura 17. Resistencia a la degradación del cuesco.....	62
Figura 18. Índice de aplanamiento y alargamiento de la partícula de cuesco	63
Figura 19. <i>Granulometría por muestras Vs. Especificación norma INVÍAS para material de afirmado</i>	80
Figura 20. <i>Granulometría del cuesco Vs. Especificación norma INVÍAS para material de afirmado</i>	83

Figura 21. <i>Convergencia de las funciones objetivo en las poblaciones evaluadas.</i>	85
Figura 22. <i>Curva granulométrica ajustada para material de afirmado.</i>	86
Figura 23. <i>Individuos con valores de IP entre 4 y 9 para material de afirmado.</i>	87
Figura 24. <i>Curva Pareto óptima de las F1 (CBR) y F2 (Costos) para Afirmado.</i>	88
Figura 25. <i>Valor de los impactos asociados al proceso extractivo.</i>	90
Figura 26. <i>Valor de los impactos asociados a la Matriz ecológica – Producción de cal.</i>	92
Figura 27. <i>Continuación de la tabla de valores de los impactos asociados a la Matriz ecológica – Producción de cal.</i>	93
Figura 28. <i>Valor de los impactos asociados a la Matriz RIAM-producción de cemento.</i>	94
Figura 29. <i>Continuación de la tabla de valores de los impactos asociados a la Matriz RIAM-producción de cemento.</i>	95

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es primordial para el progreso y crecimiento de la sociedad ya que es el medio que posibilita el transporte de las personas de un lugar a otro y así mismo genera el desarrollo económico entre regiones, es por esto, que cada vez se ve en la necesidad de construir vías duraderas y sostenibles debido que los sistemas de pavimentación consumen una cantidad sustancial de recursos, lo que ha resultado en impactos ambientales considerables, Comprender los impactos ambientales brindaría la oportunidad de reducir el consumo de recursos.

En lo que respecta a la construcción de vías, estos procesos conllevan el empleo de grandes cantidades de materiales áridos, donde su mayoría son productos de la explotación de canteras, generando el agotamiento de los recursos naturales y ocasionados impactos ambientales. Es por ello, que el uso de los residuos agroindustriales como el cuesco proveniente de la producción de palma de aceite aparece como una posibilidad de reutilización como material para mejoramiento de suelo para vías terciarias.

Las vías sostenibles que utilizan materiales reciclados se han vuelto esenciales para el mantenimiento de los recursos naturales. En lugar de desechar en vertederos, se ha considerado como un material de reciclaje para mejoramiento de suelo, reducir los impactos ambientales y mejorar el valor económico potencial del reciclaje. No obstante, es necesario un análisis detallado para que cumplan con las propiedades mecánicas de acuerdo como lo establece la norma por medio de ensayos de laboratorios.

La necesidad de gestionar los desechos de cuesco ha dado lugar a actuaciones respetuosas con el medio ambiente que fomentan la reutilización y el reciclaje de este tipo de residuos y otras formas de valorización de los mismo. La principal prioridad es fomentar la construcción sostenible,

que tiene la ventaja de disminuir el uso de materias prima y reducir en gran medida los residuos de cuesco.

Con todo lo anteriormente expuesto, el objetivo principal de este trabajo de grado es evaluar alternativas de optimización de mezclas de residuos procedentes de la agroindustria de la palma de aceite (cuesco) para el mejoramiento de suelos en vías terciarias.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En lo que respecta a la red vial, Colombia cuenta con una red vial de 206.727 km, donde 8.917 km (4,31%) son de la red primaria a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 10.389 km (5,03%) concesionados por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), 45.137 km (21,83%) corresponde a la red departamental o secundaria y 142.284 km a la red terciaria nacional de los cuales 27.577 km (13,34%) están a cargo del INVIAS, 13.959 km (6,75%) a los departamentos y 100,748 km a los municipios (48,73%) de esta red terciaria a nivel nacional, solo el 6% se encuentra pavimentado con un 33,5% en buen estado, 38,4% en regular estado y 28,1% en mal estado (Ministerio de Transporte, 2021).

La industria del aceite de palma produce actualmente grandes cantidades de residuos de biomasa que podrían procesarse y utilizarse para diferentes procesos constructivos. El impacto socioeconómico desproporcionado de la industria sugiere que seguirá generando cantidades excesivas de residuos de biomasa, lo que seguirá complicando los procedimientos de gestión de residuos. Cada hectárea de cultivo de aceite de palma emite entre 50 y 70 toneladas de residuos. La rápida expansión de las plantaciones de aceite de palma ha planteado problemas relacionados con la sostenibilidad industrial y el impacto en el medio ambiente. La destrucción de la biodiversidad de las selvas tropicales antiguas, la contaminación del aire, el suelo y el agua son preocupaciones importantes (Kahar et al., 2022).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y la gran necesidad de recursos y materiales para la construcción, operación y mantenimiento de proyectos viales, es necesario desarrollar nuevos materiales de construcción no convencionales procedentes de la extracción del aceite de palma africana, considerados desechos y que podrían ser utilizados en la estabilización de suelos,

lo cual traería una disminución del impacto ambiental y una mejora en la calidad de vida de la población localizada en la zona del proyecto.

3. JUSTIFICACIÓN

Colombia actualmente ocupa el primer puesto en la producción de aceite de palma en América y el cuarto en el mundo, el país posee 58 núcleos palmeros distribuidos en las cuatro zonas palmeras: la zona norte la componen la Costa y el Cesar con 15 núcleos, en la zona central se encuentran el Sur del Cesar, Bucaramanga y Norte de Santander con 13; la zona oriental está compuesta por el Meta y Casanare con 25; y el suroccidente abarca Tumaco y Caquetá con 5 (FEDEPALMA, 2020).

La producción de aceite de palma crudo en Colombia en 2019 alcanzó las 1.527.346 toneladas, presentando una reducción del 6 % con respecto a lo alcanzado en el 2018 (1.630.825 toneladas), cuyas ventas para exportación fueron del orden de las 826 mil toneladas, un aumento del 6 % frente a 2018. Esta fuerte dinámica exportadora de la agroindustria de la palma de aceite, ha llevado a que este producto sea después del café, los que más contribuyen al buen comportamiento de las exportaciones agrícolas del país, pues en el año 2019 el sector de la palma de aceite tuvo una participación del 11% en el PIB Agrícola Nacional (FEDEPALMA, 2020).

En el procesamiento de los frutos de palma africana hasta convertirlos en aceite, se pueden distinguir varios pasos en los que también se generan grandes cantidades de subproductos entre ellos el cuesco que se obtiene de la extracción de la almendra y corresponde al endocarpio, posee una alta resistencia; el desprendimiento del racimo de la palma africana se obtiene mediante el calentamiento en hornos y su pulverización mediante métodos industrializados (Cotes, 2017) y por ello es necesario el manejo de los mismos, garantizando una reducción a la afectación del medio ambiente.

La presente investigación está orientada a caracterizar y optimizar mezclas de estos subproductos con un tipo de suelo característico de la vía que comunica hacia la “Extractora Palmas Sicarare SAS” en el km 11, para su mejoramiento con unas pequeñas adiciones de cal y cemento recomendadas por la literatura. Lo anterior, permitirá la evaluación de otras técnicas de estabilización de suelos con materiales no convencionales que ayuden a disminuir costos de construcción y mejoramiento de vías, así como el uso racional de materiales de construcción.

El estudio se realizará con residuos procedentes de la empresa Extractora y Palmas Sicarare SAS, quien suministrará el subproducto derivado de la extracción del aceite. Así mismo, se utilizarán muestras de suelos extraídas del tramo vial localizado en el Km 11 sur de Codazzi - Vía Bucaramanga.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Evaluar el impacto ambiental para alternativas de mezclas de residuos procedentes de la agroindustria de la palma de aceite para el mejoramiento de suelos en vías terciarias.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas para suelos y desecho agroindustrial “cuesco” como posible material en procesos de afirmados en vías terciarias.
- Estimar combinaciones óptimas en mezclas de cal, cemento y cuesco para la Construcción de Carreteras terciarias según especificaciones técnicas del INVÍAS.
- Analizar los impactos ambientales de las mezclas propuestas para la construcción de carreteras terciarias.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Estado del arte

El uso sostenible de la tierra se ha identificado como una forma de abordar los desafíos relacionados con el cambio climático, la expansión de la población, la crisis alimentaria y la contaminación ambiental. La eliminación de los desechos sólidos de racimos de fruta fresca de palma de aceite se está convirtiendo en un desafío con una mayor demanda y producción de aceite de palma. Si bien esto plantea un desafío, podría convertirse en una oportunidad al utilizarlo como recurso y valorizarlo por completo para satisfacer las demandas de suelo y cultivos (Anyaocha et al., 2018)

En la actualidad, los residuos agroindustrial procedente de la palma de aceite como el cuesco suelen ser desechados si un previo aprovechamiento, especialmente en la mayoría de los países en desarrollo, que no solo consumen grandes cantidades de recursos, sino que también provocan una grave contaminación ambiental y social, por consiguientes ha sido necesario implementar la gestión integral de estos residuos llevándolo a un ciclo de economía circular lo que permite hacerles un tratamiento a estos subproductos y luego utilizarlos como insumos en el sector constructor.

5.1.1 Empleo de residuos de palma de aceite (cuesco) en diversos países

Países como Colombia, África, Malasia y Nigeria, han estudiado la posibilidad de reutilizar los residuos de cuesco como material para diferentes procesos constructivos, el cual han reutilizado millones de toneladas de estos materiales en tal aplicación. A partir de un modelo de economía circular en Colombia se utilizan los residuos de palma de aceite (cuesco) como material constructivo de mezclas de concreto y de mortero en la fabricación de adoquines y bloques de mampostería. (Buzón, 2009), en África se presenta los potenciales de los desechos sólidos, que

incluyen racimos de frutas vacíos, fibra de mesocarpio, cáscara de palmiste, como mejoradores del suelo con el fin de mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos y las propiedades del suelo, reducir la contaminación ambiental y lo que es más importante, aumentar los ingresos de los procesadores de aceite (Anyaocha et al., 2018).

En Malasia se estudió el uso del cuesco como agregado ligero para producir hormigón hoy en día hay muchos investigadores trabajando en esta área. En esta investigación se evaluó la propiedades físicas y mecánicas del cuesco junto con la durabilidad funcionales y el comportamiento estructural del hormigón (Alengaram et al., 2013).

En Nigeria se estudió el desempeño del concreto elaborado con cuesco (como reemplazo del agregado grueso) y laterita (como reemplazo parcial del agregado fino). Se evaluaron la trabajabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por hendimiento y la absorción de agua de mezclas de concreto hechas con cuesco y laterita al 10, 20 y 30% de nivel de reemplazo (Fanijo et al., 2020).

5.1.2 Aprovechamiento de los residuos de palma de aceite (cuesco) según distintos autores

Se han realizado estudios sobre residuos de palma de aceite (cuesco) de la agroindustria y su aplicación en la infraestructura vial. El presente proyecto se centra en el aprovechamiento de cuesco, residuo procedente de la empresa Extractora y Palmas Sicarare SAS, ubicada en Codazzi – Cesar; y su posible uso como material de afirmado en vías.

En el documento nombrado “Una estrategia integrada de biorrefinería para la utilización de desechos de aceite de palma” (Kahar et al., 2022), se analiza el potencial de usar los desechos de biomasa liberados en los sitios de las plantaciones de aceite de palma para producir bioquímicos

mediante el uso de enfoques integrados de biorrefinería para establecer y apoyar tecnologías verdes sostenibles.

Inicialmente se hace una revisión exhaustiva de la producción de biocombustibles (biodiesel) y otros productos químicos de base biológica a partir de desechos de aceite de palma, incluida su lignocelulosa fracciones y un análisis de los numerosos aspectos que podrían influir en futuros esfuerzos relacionados con este tema. Para lograr esto, se proporciona y analiza una descripción general de la industria del aceite de palma, los procesos de producción y el estado actual de la gestión de residuos. Además, también se analiza el aspecto tecnoeconómico de la producción bioquímica y de biocombustibles a partir del aceite de palma y los desechos del aceite de palma. Finalmente, se enfatiza la importancia de la investigación y el desarrollo para avanzar en este campo y la responsabilidad de la industria del aceite de palma en la contribución al logro de los objetivos de desarrollo sostenible.

En el presente trabajo “Uso de la cáscara de palma aceitera como agregado en el concreto de cemento: una revisión” (Hamada et al., 2020) revisa los estudios previos sobre la aplicación de la cáscara de palma aceitera (cuesco) como material de construcción.

La investigación parte del análisis a una revisión exhaustiva de estudios de investigación anteriores relacionados con el uso del cuesco y su influencia en las propiedades frescas, endurecidas y de durabilidad del hormigón de cemento. Sobre la base de una revisión detallada, se destacan las direcciones para la exploración posterior sobre la utilización de cuesco en el hormigón de cemento.

En cuanto a la investigación que lleva por título “Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar” (Quintero, 2017), evalúa el potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar. Esta investigación se fundamentó en la evaluación del potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana (raquis, fibra y cuesco), analizando su disposición, generación, características fisicoquímicas y energéticas para determinar su uso como alternativa a la leña como combustible. Estos residuos sólidos presentaron un considerable poder calorífico, de igual forma, presentan un potencial energético a tener en consideración. Del mismo modo, se determinó que con la utilización de estos recursos biomásicos en zonas rurales como medio combustible se encuentra un sustituto de la leña y a su vez el desarrollo de fuentes de energía térmica no convencionales y amigables con el medio ambiente.

(Gungat et al., 2013), desarrollaron el artículo “Efectos de la cáscara de palma aceitera y el tiempo de curado en la capacidad de carga de la subrasante de arcilla” donde se destaca la construcción de carreteras construida sobre suelo arcilloso de subrasante puede experimentar una menor resistencia al corte de la capacidad de carga, lo que puede provocar la falla de la estructura; para cumplir con el requisito de resistencia al corte, es esencial mejorar la subrasante más débil. Este estudio investiga el potencial del cuesco para mejorar la subrasante.

A partir de los efectos de la cáscara de palma aceitera y su tiempo de curado en la mezcla de la subrasante de arcilla se examinaron mediante una serie de pruebas de laboratorio. Los suelos arcillosos se mezclaron con aditivos cuesco al 10%, 20% y 30% de la mezcla total. Se realizó una

compactación Proctor modificada para obtener el contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca para la preparación de la muestra CBR. Luego, las muestras se curaron durante 7 días, 10 días, 14 días, 20 días y 28 días antes de la prueba de relación de carga de California para examinar el efecto de mejora. Los resultados revelan que el cuesco mejora la capacidad de carga de la subrasante del suelo arcilloso debido al mayor valor de CBR producido en comparación con la mezcla convencional. Los valores más altos de CBR se obtuvieron con un 30 % de cáscara de palma aceitera a los 20 días de período de curación. Por lo tanto, se puede concluir que la adición de cáscara de palma aceitera al suelo arcilloso puede mejorar la capacidad de carga de la subrasante en la construcción del pavimento.

En los experimentos desarrollados en el trabajo “Evaluación de la influencia de la adición de ceniza del cuesco de palma africana en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas fabricadas con material laterítico” (Cotes, 2017), evalúa el efecto de incluir ceniza de cuesco de palma africana (CCPA), como relleno mineral, en los índices de respuesta de un aglutinante de asfalto y el diseño de la mezcla y la respuesta mecánica de una mezclas asfálticas densas en caliente (MDC) fabricada usando un material laterítico proveniente del departamento de Vichada ubicado en el oriente de Colombia.

En la mencionada investigación además de la evaluación de la influencia de la ceniza de cuesco de la palma africana como modificador de las propiedades del asfalto y las mezclas asfálticas elaborada con material laterítico, se evaluó el efecto de la concentración volumétrica (C_v) del relleno. Para ello se utilizó la metodología de superficie de respuesta con el fin de evaluar porcentajes de aporte de la CCPA, como llenante mineral, desde la adición de 0% hasta 100% y se modificó la concentración volumétrica del relleno (C_v), desde 0.09 hasta 0.47. La influencia de la CCPA y C_v en la respuesta del cemento asfáltico se determinó mediante los ensayos de

penetración, punto de ablandamiento y viscosidad, el efecto de la inclusión de la CCPA en las interfaces asfalto- agregado, se empleó el método de placa Wilhelmy en el cemento asfáltico y para la mezcla asfalto y para el material laterítico, se utilizó la máquina de adsorción universal, y el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica se evaluó en términos de estabilidad y flujo Marshall, resistencia a la tracción indirecta, resistencia al ahuellamiento, y módulo dinámico.

5.1.3 Mejoramiento de suelo con residuos de palma de aceite (cuesco)

A través de diversas investigaciones se consiguió valorar los residuos de la palma de aceite, y más aún evaluar en particular uno de ellos: el cuesco; a partir, de sus propiedades físicas se ha logrado catalogar un segundo uso para este desecho. Sobre este tema se han presentado documentos de investigación que permitieron demostrar la aplicación del cuesco para el mejoramiento de los suelos.

El potencial expansivo de un suelo es una variable principal en la construcción de obras de infraestructura vial. Una disminución del potencial expansivo implica un mejoramiento de las características mecánicas de los materiales, que se traduce en una disminución de la probabilidad de falla en la vía. Para su estudio (Jerez & Murillo, 2016), se realizaron las curvas características de retención de agua para un suelo y tres mezclas estabilizadas con ceniza de cuesco de palma africana. Se determinó el potencial expansivo del suelo y las mezclas estabilizadas empleado la metodología expuesta por McKeen (1992). Esta metodología compara el índice de succión total – contenido de agua contra valores determinados previamente. En general suelos con índice menor indican menor tendencia a la absorción y en consecuencia menor potencial expansivo. Se encontró que, hasta ciertas dosificaciones de estabilizante, el suelo presenta un comportamiento óptimo, en términos de potencial expansivo, sin embargo, al aumentar la dosificación, el comportamiento comienza a ser desfavorable.

En cuanto a la eliminación de los desechos sólidos de racimos de fruta fresca (FFB) de palma de aceite, estos se están convirtiendo en un desafío con una mayor demanda y producción de aceite de palma. (Anyaocha et al., 2018), en su revisión presenta los potenciales de los desechos sólidos RFF, que incluyen racimos de frutas vacíos (EFB), fibra de mesocarpio (MF), cáscara de palmiste (PKS), como mejoradores del suelo. Los principales hallazgos son los siguientes: 1) la pirólisis, la gasificación, la combustión y el compostaje son procesos que pueden aumentar el valor de los residuos sólidos RFF. Estos procesos conducen a nuevos productos que incluyen biocarbón, cenizas y compost, los cuales son recursos valiosos que pueden ser utilizados para el mejoramiento del suelo. 2) La aplicación de mantillo EFB, cenizas de EFB, MF y PKS, biocarbón de EFB y PKS, y compost de EFB y MF condujo a una mejora en las propiedades fisicoquímicas del suelo y al crecimiento y rendimiento de los cultivos. Sin embargo, los informes muestran que el compost y las cenizas de EFB provocaron una disminución en el crecimiento y el rendimiento de la okra. Por lo tanto, el uso de tecnología de conversión adecuada para los residuos sólidos RFF como mejoradores del suelo puede mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos y las propiedades del suelo, reducir la contaminación ambiental y, lo que es más importante, aumentar los ingresos de los procesadores de aceite y los ahorros para los agricultores.

Como lo expone (Rudolf et al., 2021), el área de cultivo de palma aceitera se ha expandido de manera importante, es por ello que las prácticas de conservación del suelo pueden contribuir a sistemas de palma aceitera más sostenibles al aumentar los contenidos y rendimientos de carbono orgánico del suelo (COS). Una práctica de conservación de suelos en plantaciones de palma aceitera es el mulching con racimos de frutos vacíos (EFB), el cual también es conocido bajo el nombre de cuesco. En su desarrollo se estimó la relación entre el acolchado y los rendimientos con datos de panel, y entre el acolchado y las propiedades del suelo con datos transversales.

Teniendo en cuenta el posible sesgo de selección de la decisión de aplicar el acolchado EFB con estimaciones de variables instrumentales. Se utilizó un análisis descriptivo para analizar los determinantes del uso de EFB por parte de los pequeños agricultores.

(Lozano et al., 2021), en su investigación se encargaron de evaluar el mejoramiento las propiedades fisicoquímicas de los suelos degradados por sobrepastoreo, aplicando biocarbón fabricado de cuescos por pirólisis y enriquecido en biol de vacaza elaborado por fermentación anaeróbica. La metodología comprendió un Diseño en Bloques Completamente al Azar (DBCA) con un control (T0) y tres tratamientos (T1, T2, T3), con 5, 10 y 15 t h⁻¹ de biocarbón enriquecido respectivamente, asignados aleatoriamente por triplicado a 16 unidades experimentales de 2,4 m por 5,0 m (12 m²) cada una, contenidas en cuatro bloques. El análisis estadístico comprendió la prueba Shapiro-Wilks y Levene, también Tukey y Friedman. Los resultados para pH, materia orgánica, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico y nitrógeno no resultaron significativos ($p > 0,05$), en cambio el fósforo con T3 y Potasio con T2, si mostraron diferencia significativa ($p < 0,05$), para mejorar las características fisicoquímicas de los suelos sobrepastoreados por aplicación de biocarbón enriquecido con biol de vacaza.

Los esfuerzos para producir materiales alternativos, particularmente utilizando varios subproductos y/o desechos, es uno de esos pasos para abordar estas posibles preocupaciones ambientales. Ante tal panorama (Loi et al., 2019), estos autores se ocuparon en estudiar la influencia del contenido del cuesco o también llamado cascara de palma aceitera (OPS) en el comportamiento de compactación y la mejora de la resistencia de los compuestos suelo-OPS para su aplicación como material de sub-base en caminos rurales. Se evaluaron en laboratorio las propiedades básicas de las muestras de cuesco y tres muestras de suelo adquiridas localmente: caolín, arena media y arena arcillosa. En este documento se evalúa y analiza el rendimiento del

compuesto suelo-OPS en términos de su compactación y las relaciones de carga de California. En conclusión, se observó que el cuesco tiene una influencia significativa en las propiedades de compactación y resistencia (CBR); es decir, la textura de la superficie porosa de OPS es probablemente el parámetro clave que controla los parámetros de compactación.

5.1.4 Aplicaciones de los residuos de palma de aceite (cuesco) en Ingeniería

Civil

Son muchos los avances innovadores en el que se está aprovechando los residuos de cuesco proveniente de la palma de aceite para el campo de la construcción, donde desde la academia ha sido un tema de mucha relevancia donde la implementación de estos materiales ha sido muy satisfactoria según los estudios que se han realizados hasta la actualidad.

(Mannan & Ganapathy, 2002) en su estudio de investigación denominado “Propiedades de ingeniería del concreto con cáscara de palma aceitera como agregado grueso” propone evaluar las propiedades físicas y su comportamiento de los hormigones con cuesco y de control en dos condiciones de curado. Se realizó el estudio a corto plazo, de hasta 90 días, se determinaron las propiedades del concreto de cáscara de palma aceitera (cuesco), la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción por división, módulo de elasticidad, contracción por secado y absorción de la superficie inicial, se comparó con hormigón de control. Se emplean dos condiciones de curado, a saber, una para simular la condición práctica de curado y otra condición de curado de laboratorio. Se observa que el concreto con cuesco tiene suficiente resistencia para ser aceptado como concreto ligero estructural y que la tendencia de los comportamientos del concreto con cuesco y el concreto de control es muy similar.

(Yaro et al., 2021) en su estudio de investigación denominado “Evaluación del rendimiento de mezclas bituminosas de matriz de piedra reforzada con fibra de aceite de palma utilizando

procesos de mezcla tradicionales y secuenciales” se basó en la viabilidad de utilizar residuos de palma de aceite cuesco como estabilizador en hormigón asfáltico de matriz pétreo y evalúa la influencia de dos procesos de mezcla diferentes (tradicional y secuencial) en sus propiedades. Las mezclas en hormigón asfáltico de matriz pétreo se reforzaron con varios contenidos de cuesco, 0,6 % en peso de la mezcla total y se evaluaron las propiedades volumétricas y mecánicas. Se usaron varios métodos de prueba de laboratorio estándar para examinar las mezclas: propiedades Marshall, prueba de drenaje, Cántabro, módulo de rigidez, prueba de daño por humedad. El estudio reveló que la mezcla secuencial es una alternativa de mezcla más viable para en hormigón asfáltico de matriz pétreo, ya que muestra un menor drenaje, agujeros de aire y un contenido de betún óptimo con mayor estabilidad Marshall y vacíos en las cifras de agregados minerales. Mientras que para las propiedades mecánicas la mezcla secuencial muestra mayores resistencias a la humedad, módulo de rigidez y menos pérdida Cántabro para todos los tipos de mezclas en comparación con las mezclas convencionales.

(Becerra, 2017) en su estudio denominado “Caracterización del desecho agroindustrial de la palma de aceite (cuesco) para el mejoramiento de las capas granulares de la estructura de pavimento” se evaluó las propiedades físicas del cuesco mediante las especificaciones y ensayos de laboratorio de la normatividad del Instituto Nacional de vías INVÍAS. se desarrolló en su metodología la utilización de los residuos de cuesco. Dentro de este alcance, los cuescos fueron recopilados, luego fueron triturados a tamaños específicos; Se determinaron los siguiente ensayos granulometría, desgaste en la máquina de los ángeles, humedad, densidad, y se compararon sus resultados con las de la norma INVIAS.

(García & Díaz, 2019) en su trabajo denominado “Evaluación de la resistencia a la compresión del concreto utilizando el cuesco proveniente de los residuos de fruto fresco de la

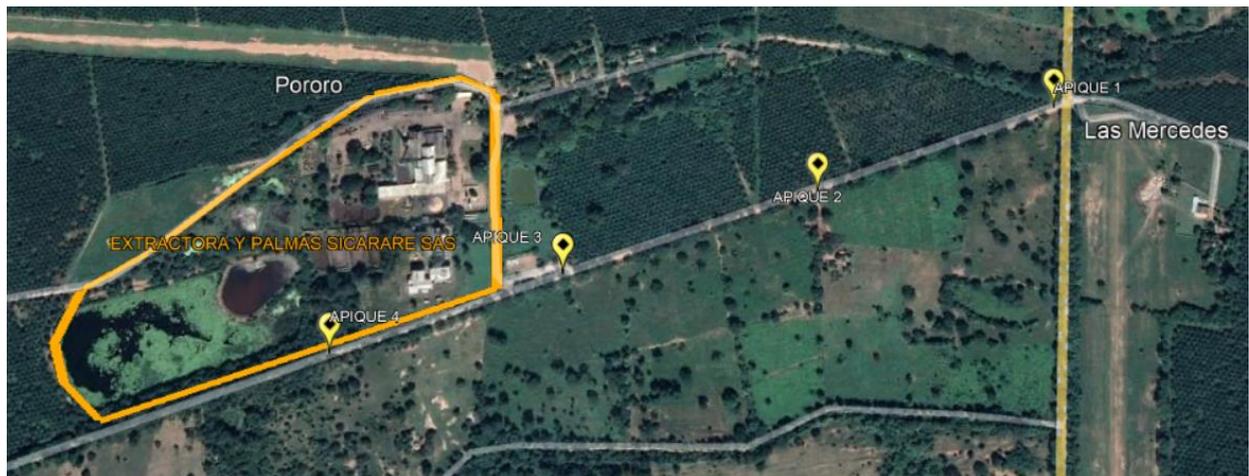
palma africana y el concreto de residuos de construcción y demolición en obras civiles (RCD)” planteo el uso del concreto y del cuesco del fruto de la palma africana procesada en los llanos orientales y del concreto de residuos de construcción y demolición, como suplemento en diferentes porcentajes en el agregado grueso de la mezcla de concreto, con el fin de evaluar la resistencia a la compresión. Los datos se obtuvieron experimentalmente a través de ensayos de laboratorios, establecidos por las normas técnicas colombianas. En este proceso se elaboraron ciento cinco (105) cilindros de concreto, así: 15 cilindros con materiales convencionales, noventa (90) cilindros que se dividirán en dos partes: el 50% llevara material de residuo de fruto fresco y 50% material concreto de RCD; cada parte se subdivide en tres (3) fracciones iguales, sustituyendo el agregado grueso en porcentajes de 10%, 20% y 30% de material reciclado. se desarrollaron ensayos donde se fallaron los especímenes a las edades de 7, 14 y 28 días, que permitieron el análisis de los resultados, siendo estos favorables en los valores de resistencia, obtenidos en la mayoría de las variaciones.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Descripción general de la empresa Extractora y Palmas Sicarare SAS.

La empresa Extractora y Palmas Sicarare se encuentra localizada sur de Codazzi - Vía Bucaramanga, en el departamento del Cesar. Fue fundada a partir de los años, 2009 su actividad está centrada en cultivo de palma de aceite y extracción del mismo (figura 1),.

Figura 1. Localización general de la Extractora y Palmas Sicarare S.A.S



Fuente: Google Earth, 2021.

En el año 2009 se inició el montaje de la planta Extractora de aceite cuenta con una extensión 3200 hectáreas de cultivo de palma de aceite, actualmente es una de la empresa de mayor extracción de aceite de la zona norte. Logrando una cifra de promedio 23.36% (FEDEPALMA, 2020).

6.2 Descripción general de la vía de estudio.

Es una vía en afirmado ubicada en el tramo vial localizado en el Km 11 sur de Codazzi - Vía Bucaramanga, en la cual se extrajeron las muestras de suelos para el desarrollo de la investigación.

Figura 2. Localización general vía de estudio



Fuente: Google Earth, 2021.

6.3 Geología de la zona de estudio.

La vía de estudio se encuentra dispuesta sobre las siguientes unidades geológicas:

6.3.1 Unidad Metasedimentaria de La Virgen (PZmv).

La unidad Metasedimentaria de La Virgen se encuentra conformada por metaareniscas grises a gris verdosas y amarillentas, metalodolitas gris verdosas, ligeramente micáceas, metalimolitas gris a gris verdosas y metaconglomerados cuarzosos y en menor proporción filitas. su nombre se debe a la quebrada La Virgen, municipio de Pelaya, en el departamento del Cesar. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.2 Formación La Quinta (T3Jq).

La Formación La Quinta en la quebrada La Ge, se encuentra dividida en tres partes:

- Intervalo inferior: se compone de arcosas marrón a rojas oscuras, con tamaño de granos finos a medios, con bajas intercalaciones volcánicas y cuenta con un espesor aproximado de 700 a 800 metros.

- Intervalo medio: presenta capas de basaltos-andesitas, conglomerados tobáceos, y arcosas verdes, con tamaño de granos medios a gruesos, con interrupciones de arcosas marrón a rojo oscuro, y lutitas rojas a negras fosilíferas. Tiene un espesor de 100 metros.
- Intervalo superior: Este intervalo se compone de arcosas rojas oscuras a marrón, tienen grano grueso, y capas finas de ceniza félsica roja a rosada. Su espesor varía de 700 a 800 metros. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.3 Formación Río Negro (K1r).

La Formación Río Negro posee areniscas, conglomerados, lodolitas y arcillolitas. Básicamente, las areniscas blancas son de grano grueso. Los conglomerados son de tamaño variable; las lodolitas exponen tonos brillantes de amarillo, rojo y morado por presencia de óxidos de hierro. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.4 Grupo Cogollo (K1K2cg).

El Grupo Cogollo se encuentra dividido de la siguiente forma, de base a techo:

- Formación Lagunitas: son capas gruesas de calizas fosilíferas y posee un espesor máximo de 290 metros.
- Formación Aguas Blancas: dividida en tres miembros:
 - Miembro Las Ánimas: Compuesta por lutitas negras carbonosas, calcáreas con abundante materia orgánica, con concreciones calcáreas hacia la base. Su espesor es de 285 metros.
 - Miembro Tucuy: Hacia la parte baja está compuesta por limolitas arenosas de color gris oscuro, con forma de granos subangular a subredondeado, ligeramente sorteadas, compuestas de cuarzo, con matriz arcillosa, cemento silíceo o calcáreo. Su espesor medido es de 450 metros.

- Miembro Maracas: compuesto por calizas masivas, con un espesor de 217 metros (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.5 Formación La Luna (K2I).

La formación La Luna se encuentra constituida por una secuencia típica de calizas y lutitas calcáreas con abundante materia orgánica y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro. Es frecuente la presencia de chert negro en forma de nódulos y concreciones elipsoidales de 1 a 80 centímetros. Su espesor medido es de 300 metros (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.6 Formación Cuesta (N1N2c).

Esta formación está compuesta de areniscas continentales mal seleccionadas con variaciones de conglomerados, limolitas y arcillolitas. Las areniscas contienen granos de cuarzo angulares a subredondeados, son grises blancuzcas a grises verdosas y marrones claras, afloran en estratos delgados a gruesos con estratificación cruzada, con intercalaciones de limolitas y arcillolitas yesíferas abigarradas (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.7 Abanicos Aluviales (Q2ab).

Estos depósitos están conformados por cantos y bloques heterométricos, con fragmentos hasta de 2 metros, que pueden tener algunos niveles areno limosos y areno gravosos con espesores entre 15 a 25 metros (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.8 Depósitos aluviales (Q2al).

La composición litológica de estos depósitos depende del tipo de rocas en las regiones drenadas. En general, son intercalaciones irregulares de capas de gravas, arenas, limos y arcilla,

formados por la acumulación reciente de los ríos y quebradas del área (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.9 Depósitos de planicies aluviales (Q2pa).

La composición de estos depósitos está relacionada con las inundaciones periódicas de los principales cauces del área. No se conocen dataciones de esta unidad, sin embargo, por su posición estratigráfica y el desarrollo de los perfiles superiores de suelos se considera del Holoceno. Generalmente, son suelos areno limosos de color naranja (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.3.10 Relleno antrópico (Q2ra).

Son depósitos conformados en su mayor parte por fragmentos de rocas sedimentarias, tales como areniscas, limolitas, shales, arcillolitas y lutitas, producto de la remoción de los materiales para llevar a cabo la extracción del carbón (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

6.4 Los desechos de cuesco proveniente de la palma de aceite.

La cáscara de palma aceitera (CUESCO) es un biorresiduo sólido que proviene de la industria del aceite de palma. El cuesco es un material fibroso producido al triturar la semilla de palma de aceite durante la extracción de aceite de palma. Este residuo agroindustrial tiene un uso limitado en la combustión para generar electricidad, en la producción de un fertilizante orgánico, y como material de pavimentación para caminos de plantación. En muchas plantas extractoras de aceite de palma, el cuesco se vierte con frecuencia en el vertedero sin ningún proceso de tratamiento. (Alfatah et al., 2022)

6.5 Ventajas de residuos de cuesco.

Las principales ventajas de los usos de cuesco con relación hacer reutilizados son las siguientes:

- Al poseer una alta resistencia es usado como reemplazo de áridos en la mezcla de concreto y en comparación con el costo de los agregados naturales este tiene un bajo valor económico para ser utilizados en procesos constructivos (Buzón, 2009).
- Este desecho posee características mecánicas interesantes: una alta dureza, alta resistencia al desgaste y poca densidad, por lo cual es arrojado sobre las vías internas de las plantaciones como material base o capa de rodadura, mejorando así la movilidad de las mismas (Quintero, 2017).
- La reutilización del cuesco en el sector constructivo juega un papel importante en el aumento de la sostenibilidad ambiental puesto que, con la aplicación de estos materiales, se podría lograr una construcción más sostenible, limpia y verde (Khankhaje et al., 2017).

6.6 Desventaja de residuos de cuesco.

- La producción de aceite de palma genera una alta demanda de desechos de cuesco que son depositados en vertederos ocasionando contaminación paisajística (Rudolf et al., 2021).
- El no aprovechamiento de este desecho da como resultado su quema en calderas aumentando la contaminación ambiental (Becerra, 2017).
- El desecho de cuesco tiene impactos ambientales nocivos y requieren una buena gestión (Truckell et al., 2019).

6.7 Vías terciarias.

En Colombia las vías con superficie de rodadura en afirmado se encuentran el 50% en estado regular, en mal estado 34,5% y solo el 15,5% en buen estado (Ministerio de Transporte, 2021). Las vías en afirmado se deterioran de manera rápida bajo la acción del tránsito y los efectos

ambientales, requieren más a menudo intervenciones para conservar la superficie de rodadura en condiciones aceptables, generando altos costos de mantenimiento y una alta necesidad de materiales pétreos para la continua adaptación de la superficie de rodadura, produciendo más impactos ambientales a raíz de la explotación del material de afirmado para realizar las actividades de mantenimiento (Orobio et al., 2007).

6.8 Mejoramiento de suelo.

Las técnicas de tratamiento de suelos contribuyen a la competitividad y sostenibilidad de la ingeniería vial. Las propiedades ingenieriles de los materiales de construcción determinan su potencial uso y aplicación en obra civil. Las características del material deben satisfacer las funciones de ingeniería que contribuyen a la durabilidad y calidad de toda la estructura vial (Cabrera et al., 2018).

Debido al continuo desarrollo de la urbanización y al aumento de la población, la cantidad de suelo adecuado disponible para la ingeniería civil se ha vuelto bastante limitada. Por lo tanto, la mejora del suelo se ha vuelto obligatoria en muchas circunstancias, por ejemplo, con respecto a factores tales como suelos in situ, costos, mantenimiento y suelo limitado. Los métodos de mejoramiento de suelos se usan comúnmente, especialmente en suelos con suelos blandos y débiles, cimientos, pavimentos o capas superficiales bituminosas. El cemento y la cal son aglutinantes tradicionales bien conocidos que se utilizan para mejorar el suelo; las partículas del suelo sujetas a estos aglutinantes se unen entre los granos del suelo a través de reacciones químicas (Bagriacik, 2021).

6.9 Análisis Multiobjetivo.

El análisis multiobjetivo es un modelo de toma de decisiones, pero con bases en la optimización de una función objetivo dentro de un proceso de múltiples funciones que actúan simultáneamente (Y. Jiménez, 2017).

“El AM es usado para describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, a partir de una evaluación de varios criterios. Dichos criterios, son los puntos de vista considerados importantes para la resolución de un problema, los cuales constituyen la base para la toma de decisiones que puede ser medida y evaluada” (Bastidas, 2010).

“Los Algoritmos Evolutivos, se crearon para mejorar la eficiencia heurística, es decir, encontrar la solución a un problema destinando la menor cantidad de recursos, a esta técnica se le conoce como Metaheurísticas y están basadas en los comportamientos observados en la naturaleza” (Ramírez, 2014).

Existen tres tipos de problemas multiobjetivo: Minimizar todas las funciones objetivo, Maximizar todas las funciones objetivo y Minimizar algunas y maximizar las funciones objetivo restantes (Quintero, 2004).

6.10 Definición de Algoritmos Evolutivos.

Los Algoritmos Evolutivos, son una herramienta de optimización y búsqueda, basada en los mecanismos de selección y genética natural (Arceo et al., 2013), donde los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse fácilmente a los cambios (en los genes) que se producen en su entorno (atributos más deseables); es decir, funcionan con base en la teoría de la evolución de Darwin.

6.10.1 Función objetivo.

La función objetivo, es aquella que permite medir cualitativamente el funcionamiento del sistema en un proceso de optimización, buscando maximizar o minimizar la función dentro de las posibles soluciones. La función objetivo representa la propiedad más importante del fenómeno analizado, que en el caso de la optimización de residuos de Cuesco será el Índice de Soporte de California CBR y los costos (Y. Jiménez, 2017).

6.10.2 Población.

Indica el número de muestra que tenemos para una generación determinada, esta debe ser lo suficientemente amplia, para que haya un adecuado número de reproducciones y se llegue a una solución óptima (Ramírez, 2014).

6.10.3 Función de evaluación (Fitness).

Esta función es la que vincula al Algoritmo Genético con el problema de optimización y es la que evalúa la calidad de la solución (Ramírez, 2014).

6.10.4 Restricción.

Es un factor que permite ceñir o disminuir a un límite un determinado elemento, de modo que haya confiabilidad en el diseño. (Ramírez, 2014)

6.10.5 Operadores Genéticos.

En un AE, el paso de un proceso al siguiente se hace a través de una serie de operadores Genéticos, entre los cuales los más empleados son los operadores de selección, cruce y mutación.

- **Selección.**

Son los encargados de elegir los individuos con y sin oportunidades de reproducción, para ello, se propone un mayor número de oportunidades de reproducción a los individuos más aptos (Gestal et al., 2010).

- **Métodos de selección.**

Dentro de estos métodos se encuentran los probabilísticos y determinísticos. El primer tipo adjudica las posibilidades de reproducción con un componente importante basado en el azar, en este grupo se encuentran los Algoritmos de selección mayormente utilizados, esto es por ruleta o por torneo (Gestal et al., 2010).

- **Cruzamiento.**

En esta etapa los códigos genéticos de los individuos se recombinan para formar nuevos individuos con la esperanza de que éstos hereden de sus progenitores las características deseables. (Gestal et al., 2010)

Los métodos de cruzamiento más comunes son, uso de un cruce de un punto y cruce de dos puntos (Coello, 1995). El cruce en un punto, es una de las técnicas más sencillas y se trata en el corte de cromosomas de dos individuos por un punto seleccionado aleatoriamente para generar dos segmentos diferenciados, con el fin de heredar información genética de los padres (Gestal et al., 2010). Mientras que el cruce en dos puntos se producen dos cortes, dicho corte se debe realizar de tal manera que se originen tres segmentos, de los cuales el segmento central debe contener la información genética de ambos padres (Gestal et al., 2010).

- **Mutación.**

La mutación de un individuo se basa en la variación aleatoria de parte del cromosoma de los individuos, permitiendo alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual (Arceo et al., 2013). Este proceso se realiza conjuntamente con el cruce; si el cruce tiene éxito entonces uno de los descendientes, o ambos, se mura con cierta probabilidad.

- **Elitismo.**

El elitismo es un caso particular de un tipo de operador denominado copia, el cual se basa en copiar siempre al mejor o mejores individuos de una generación en la generación siguiente. De esta manera se garantiza que el proceso de búsqueda nunca dará un paso atrás en cuanto a la calidad de la mejor solución obtenida (Gestal et al., 2010).

6.11 Etapas del proceso de un Algoritmo Evolutivo de Métodos de Optimización

(AEMO)

1. Generación aleatoria de la población inicial, constituida por cromosomas o cadenas de caracteres que representan las posibles soluciones del problema (Coello, 1995).
2. Ordenar la población, en función del valor obtenido, quedando en primer lugar los individuos más adaptados (García, 2014).
3. Selección de los individuos mejor calificados con mayor posibilidad de reproducción, esta selección se realiza mediante diferentes métodos que determinarán la estrategia de búsqueda del algoritmo.
4. Cruzamiento de los individuos seleccionados, los sobrevivientes intercambian material cromosómico y los descendientes formarán la población de la siguiente generación (Coello, 1995).

5. Mutación de individuos con el objetivo de generar nuevos individuos que exploren regiones del dominio del problema (Coello, 1995).

6. Terminación del Algoritmo Evolutivo, para ello se utilizan normalmente dos criterios principales para la detención: 1. Correr el Algoritmo Evolutivo durante un número máximo de generaciones y 2. Detenerlo cuando la población se haya estabilizado, es decir, cuando todos o la mayoría de los individuos tengan la misma aptitud (Coello, 1995).

6.12 Frente Óptimo de Pareto

Una característica fundamental de los problemas de optimización multiobjetivo es que poseen más de una solución factible, por ende, es relevante decidir cuál de las soluciones óptimas satisface mejor las necesidades del problema atendiendo a criterios de experiencia e información disponible (Guzmán & Delgado, 2005).

“En optimización multiobjetivo, el término optimizar trata de encontrar un compromiso entre las distintas funciones objetivo en vez de una sola solución. La representación de las funciones objetivo cuyos vectores son no dominados y además están en el conjunto de óptimos de Pareto es llamado el Frente de Pareto” (Quintero, 2004).

6.13 Ventajas de los AEMO

Las principales ventajas de los Algoritmos Evolutivos respecto demás métodos heurísticos son los siguientes:

- “Son eficientes, pues no necesitan información complementaria, solamente emplean la función objetivo” (Arceo et al., 2013).
- “Buscan una población de puntos, lo cual reduce la probabilidad de caer en una solución falsa” (Arceo et al., 2013).
- “Emplean reglas estocásticas, es decir, emplean operadores aleatorios para guiar la búsqueda de los mejores puntos” (Arceo et al., 2013).

- “Son simples y pueden ser aplicados a cualquier problema formulado como la optimización de una función objetivo independientemente del campo de aplicación, además, permiten explorar una multitud de posibles soluciones” (Molina, 2012).
- “Se adaptan ante los cambios que pudieran existir en el ambiente durante la ejecución del programa permitiendo encontrar buenas soluciones ante condiciones variables” (Molina, 2012).
- “Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales. Adicionalmente, cuando se usan para problemas de optimización resultan menos afectados por las falsas soluciones que las técnicas tradicionales” (Coello, 1995).
- “Usan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las otras técnicas” (Coello, 1995).

6.14 Desventajas de los AEMO

- “Dificultad de encontrar la mejor representación para el problema a resolver, teniendo en cuenta que una mala elección puede llevar a errores o a no encontrar soluciones óptimas” (Molina, 2012).
- “Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se utilicen. Además, pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole” (Coello, 1995).

7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La ejecución de la investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

7.1 Revisión y análisis del estado del arte.

En esta etapa se establece la revisión de documentos para conocer los antecedentes, el estado actual y las tendencias tecnológicas para el aprovechamiento de los cuescos como mejoramiento de suelos en infraestructura vial, para la validación de la información se utilizará bases de datos académicos tales como Scopus, ScienceDirect, ProQuest, artículos científicos, tesis PhD, patentes, instituciones gubernamentales y páginas web.

7.2 Población de la investigación

La población de la investigación es la empresa palmera Extractora Sicarare SAS ubicada en el Municipio de Codazzi Cesar, cuyos directivos permitieron la realización para obtener información preliminar y autorizaron la visita de campo, toma de muestras y suministro de información confidencial. Así mismo, el suelo a mejorar será tomado del tramo vial localizado en el Km 11 sur de Codazzi - Vía Bucaramanga.

7.3 Zona de almacenamiento de los desechos de cuesco y muestra de suelos

Los residuos de cuesco son facilitados por la “Extractora y Palmas Sicarare SAS” ubicada en Codazzi Cesar, lo cual se da por el proceso de la extracción de aceite y así mismo se tomaron la muestra de suelos extraída del tramo vial km 11 aledaña a la empresa (figura 3).

Figura 3. vía en afirmado y planta extractora de aceite



Fuente: propia

7.4 Toma de muestras de suelo y residuos de cuesco

Para la obtención de muestras de suelo a mejorar y residuos de cuescos, se realizaron en el tramo vial localizado en el Km 11 sur de Codazzi - Vía Bucaramanga, el cual se intervino a una longitud de 1,8 km; en intervalo de 450m por punto para un total de 4 apiques con una cuadrícula de 0.50m x 0.50m a diferentes profundidades comprendida entre 0.85m-1.20m. Obteniendo un solo tipo de estrato en las muestra de suelo tomadas, estos apiques fueron establecidos de acuerdo a el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVÍAS. Así mismo, se solicitará a la empresa Extractora Sicarare SAS, un número de muestras representativas de tipo aleatorio de los residuos de la palma de aceite, teniendo en cuenta lo establecido en las normas de ensayos para vías INV-E-101, INV-E-102, INV-E-103 establecidas por el Instituto Nacional de Vías INVÍAS.

Figura 4. Ubicación general de toma muestra de suelos y residuos de cuesco



Fuente: Google Earth, 2021.

Figura 5. Toma de muestras del suelo



Fuente: propia

7.5 Metodología para la caracterización del suelo

El cuarteo manual es un procedimiento que se realiza antes de llevar a cabo cualquier ensayo de materiales de agregados, su finalidad es la de obtener una muestra representativa, con características similares a la del lugar de donde se tomó la muestra de suelo. Su procedimiento es el siguiente:

- Se inicia adecuando la superficie sobre la cual se colocará las muestras de suelo traída de campo, donde esta debe estar condiciones limpias, nivelada y dura para que no se altere el material.
- Usando una pala se mezcla el material tres veces continuas; para el final conformar una pila cónica y colocar panadas en el centro a modo de que el suelo quede esparcido por todos lados.
- Luego el cumulo de suelo es aplanada hasta lograr un espesor y diámetro requerido, verificando que cada cuarto del círculo quede en partes iguales.
- La muestra es dividida en cuatro partes iguales del mismo tamaño y se aparta dos caras opuestas.
- El material sobrante es retirado de la muestra representativa, mientras que las dos caras elegidas se mezclan y esa será el material a utilizar en los ensayos de agregados.

Figura 6. Cuarteo manual en muestra de agregado



Fuente: propia

7.5.1 Humedad

El contenido de humedad es un indicador de la cantidad de agua presente en el suelo, es decir, es la relación entre la masa de agua contenida en los espacios porosos del suelo y la masa sólida de partículas en ese material. La norma INV-E-122-13 establece el procedimiento para su determinación. Básicamente se toma el peso de la muestra húmeda, luego se lleva al horno durante 24 horas con una temperatura constante de 110 °C y finalmente se saca del horno, se toma la lectura del peso seco y se obtiene la relación de pesajes.

7.5.2 Granulometría

El análisis granulométrico es uno de los parámetros fundamentales que determinan la composición de partículas en las muestras de sedimento. Este análisis ayuda a identificar el tamaño del grano y el porcentaje de las fracciones de tamaño individual en la muestra de suelos.

En el ensayo de granulometría se realizó con base en la norma INV-E213-13 para definir de forma cuantitativa la distribución que presenta los tamaños de partículas de las muestras de suelo; para esto se utilizó una serie de tamices con mallas de acero inoxidable. El procedimiento

se llevó a cabo manualmente, con la secuencia de tamaño de mallas para firmado. 2”, 1 ½”, 1”, ¾”, 3/8”, No. 4, No. 10, No. 40 y No. 200 (figura 7).

Figura 7. Serie de tamices para análisis granulométrico

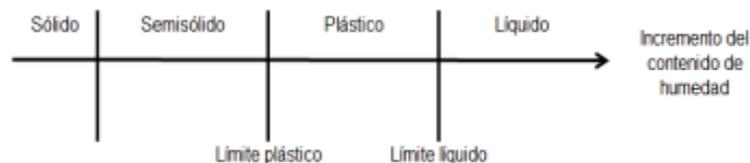


Fuente: propia

7.5.3 Límites de Consistencia del suelo

La consistencia del suelo es la fuerza con la que los materiales del suelo se mantienen unidos o la resistencia de los suelos a la deformación y ruptura. La consistencia se mide para muestras de suelo mojado, húmedo y seco. Por lo tanto, “dependiendo de la cantidad de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados denominados, sólido, semisólido, plástico y líquido” (Braja, 2015). (Figura 8).

Figura 8. Límites de Atterberg



Fuente: Braja, 2015

- **Límite líquido (LL)**

El límite líquido es el porcentaje de contenido de humedad en el que un suelo cambia al disminuir la humedad de la consistencia líquida a la plástica o al aumentar la humedad de la consistencia plástica a la líquida. La norma INV-E-125-13 establece el procedimiento para su determinación. El cual consiste en agregarle agua destilada al suelo (500 g) y mezclarlo bien para formar una pasta uniforme. Se deberá colocar una porción de la pasta en la copa de la cazuela de casagrande y extenderla con unos pocos golpes con una espátula. Luego se recorta a una profundidad de 1 cm en el punto de máximo espesor y se devuelve el exceso de tierra al plato. Con la herramienta del ranurador, corte un surco a lo largo de la línea central de la mancha de tierra en la copa, de modo que se forme un surco limpio y afilado de la dimensión adecuada (11 mm de ancho en la parte superior, 2 mm en la parte inferior y 8 mm de profundidad). Posterior a esto, se levanta y se deja caer la copa girando la manivela a una velocidad de dos revoluciones por segundo hasta que las dos mitades de la torta de suelo entren en contacto entre sí en una longitud de aproximadamente 13 mm solo por flujo, y se registra el número de golpes. Por último, se toma una porción representativa del suelo de la copa para determinar el contenido de humedad y se repite la prueba con diferentes contenidos de humedad al menos cuatro veces más para golpes entre 10 y 40.

- **Límite plástico (LP)**

El límite plástico es el porcentaje de contenido de humedad en el que un suelo cambia al disminuir la humedad de la consistencia plástica a la semisólida o al aumentar la humedad de la consistencia semisólida a la plástica. El límite plástico es el límite inferior del estado plástico, un pequeño aumento de la humedad por encima del límite plástico destruirá la cohesión del suelo.

Según la norma INV-E-126-13 el procedimiento se realiza enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo en forma de rollitos, donde el límite plástico es la humedad con la cual el suelo se desmorona a un diámetro de 3.2 mm (Braja, 2015).

▪ **Índice de Plasticidad**

El índice de plasticidad (PI) se puede definir como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico; se expresa en porcentaje del peso seco de la muestra de suelo. Muestra el tamaño del rango de los contenidos de humedad en los que el suelo permanece plástico. En general, el índice de plasticidad depende únicamente de la cantidad de arcilla presente. Este indica la finura del suelo y su capacidad de cambiar de forma sin alterar su volumen. Un IP alto indica un exceso de arcilla o coloides en el suelo. Su valor es cero siempre que el límite plástico sea mayor o igual que el Límite Líquido. La norma INV-E-126-13 establece el procedimiento para su determinación (Figura 9).

Figura 9. Equipos y elementos para determinación del límite líquido y plástico



Fuente: propia

7.5.4 Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles

La prueba de abrasión de la máquina de Los Ángeles (LA) se usa ampliamente como indicador de la calidad relativa de los agregados. Mide la degradación de granulometrías estándar de agregados cuando se someten a abrasión e impacto en un tambor de acero giratorio con una carga abrasiva de bolas de acero.

El tambor está equipado con un estante interno que levanta y deja caer la carga y la muestra con cada revolución, generando fuerzas de impacto. Una vez que la máquina ha completado las rpm requeridas, se retiran los contenidos y se mide el porcentaje de pérdida. En la norma INV-E-218-13, se muestra el procedimiento a emplear (figura 10).

Figura 10. Máquina de los Ángeles para determinación de la Resistencia al Desgaste



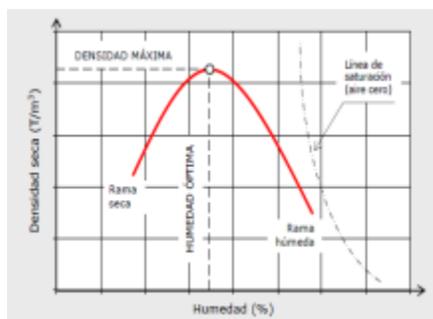
Fuente: propia

7.5.5 Ensayo Proctor modificado

La Prueba Proctor Modificada se realiza para conocer las características del suelo a través de la compactación con el cambio en el contenido de agua y finalmente nos da la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad. Es una versión modificada de la Prueba Proctor Estándar. Generalmente se emplea en circunstancias de fuerte consolidación, por lo que también

se conoce como prueba de consolidación. La capacidad portante y el esfuerzo cortante son las propiedades de interés en este ensayo. La norma INV-E-142-13 establece el procedimiento para su determinación (Figura 11).

Figura 11. Curva humedad – Densidad seca máxima



Fuente:(Bañón et al., 2000)

7.5.6 Índice de soporte de California CBR

La relación de carga de California (CBR) es un método útil para evaluar la resistencia de diferentes capas de pavimento comparándolas con la resistencia de la roca triturada estándar y se representa en porcentaje. Por lo general, el valor CBR se usa para determinar el espesor de las capas de pavimento y también para evaluar el módulo de rigidez y la resistencia al corte del material de subrasante. La prueba CBR consume bastante tiempo, es costosa y tediosa, pero es necesario realizar múltiples pruebas a lo largo del pavimento para tener una idea adecuada de la resistencia de la subrasante

Los ensayos de CBR se realizaron siguiendo el procedimiento establecido en la norma INV-E-148-13, un total de 2 apiques de suelo (apique 1,4) en donde se utilizaron las humedades óptimas de compactación obtenidas en el ensayo de Proctor modificado (Figura 12) y, sumergidos en agua por un período de 4 días. El ensayo de penetración se llevó a cabo en una máquina digital

HM 3000 marca HUMBOLDT mostrada en la figura 13; aplicando una carga de 45 kN a una velocidad de penetración constante de 1.27 mm/min.

Figura 12. Ensayo Proctor modificado para la determinación de humedad óptima y densidad seca máxima



Fuente: propia

Figura 13. Máquina HM 3000 para la determinación del CBR



Fuente: propia

7.6 Metodología para la caracterización del cuesco

Para dar inicio a los ensayos de laboratorio dispuestos a la caracterización de los residuos de cuesco, se inició con un cuarteo manual, el cual permitió obtener una muestra representativa de un tamaño conveniente, posibilitando desarrollar las pruebas designadas en laboratorio. Dicho

procedimiento requiere que la superficie donde se trabaja esté en condiciones óptimas, es decir, la zona dispuesta para cuartear el cuesco fue limpiada, verificando que estuviera nivelada y firme.

Haciendo uso de un palustre se vertió el material en la superficie, donde se homogeniza y termina formándose una pirámide cónica; para posteriormente ser aplanada hasta que el material tenga un diámetro y espesor uniforme. Luego de tener el círculo, se dividió la muestra en cuatro secciones iguales y se retiró dos partes diagonalmente opuestas. Las divisiones de cuesco restantes, se mezclaron nuevamente para repetir el proceso descrito anteriormente hasta que se logró una muestra reducida al tamaño deseado para la ejecución de los diferentes ensayos.

Figura 14. Cuarteo manual en residuos de cuesco



Fuente: propia

7.6.1 Humedad

El contenido de humedad es un indicador de la cantidad de agua presente en el suelo, es decir, es la relación entre la masa de agua contenida en los espacios porosos del suelo y la masa sólida de partículas en ese material. La norma INV-E-122-13 establece el procedimiento para su determinación. Básicamente se toma el peso de la muestra húmeda, luego se lleva al horno durante

24 horas con una temperatura constante de 110 °C y finalmente se saca del horno, se toma la lectura del peso seca y se obtiene la relación de pesajes (Figura 15).

Figura 15. *Humedad del cuesco*



Fuente: propia

7.6.2 Granulometría

La granulometría de un material consiste en la medida que tienen las fracciones o partículas que lo componen, y la distribución que presentan sus tamaños; lo cual permite precisar sus propiedades mecánicas entre otras características. Para definir la granulometría del cuesco se usó la norma INV-E213-13, que define el procedimiento a realizar; con base en ello se tomó una muestra con peso precisado, para posteriormente ser lavada y dispuesta en el horno por un tiempo de 24 horas. Una vez retirado el cuesco del horno se realiza el tamizaje.

Dicho tamizaje consistió en pasar todo el material por una serie de tamices, los cuales son especificados para material en afirmado, utilizando la siguiente serie: 2", 1 ½", 1", ¾", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40 y No. 200; como se observa en la figura 16. Luego se procedió a pesar el material retenido en cada tamiz, para dar por finalizado este ensayo en laboratorio.

Figura 16. Granulometría del cuesco



Fuente: propia

7.6.3 Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles

La prueba de desgaste a través de la máquina de los ángeles, fue realizada en el cuesco con el fin de definir la resistencia que presenta este material ante la acción de abrasión o trituración. Para llevar a cabo este ensayo, se tomó como guía la norma INV E-218-13; la muestra a trabajar se obtuvo pasando el material por los tamices de 1 ½” y ¾”, donde se tamizó 2500 gr de material retenida en la malla de 37.5 mm y 2500 gr de material retenido en la malla de 19 mm, posteriormente fue lavada y llevada al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Se continuó adecuando la máquina para su utilización, donde una vez fue retirado el material del horno, se dejó reposar unos minutos y luego fue depositado en el tambor de la maquina junto con las 12 esferas, y se dio inicio al funcionamiento del mecanismo en tiempo estimado de 16 minutos, donde la velocidad de trabajo estuvo comprendida entre 30 y 33 rpm de manera uniforme.

Una vez terminado el tiempo en la máquina, se descargó el material sobre la bandeja, y se separó de las esferas, para ser lavado y llevado al horno donde fue secado. Obtenido el material seco se pasó por el tamiz No 12 y se pesó el material que quedó retenido.

Figura 17. Resistencia a la degradación del cuesco



Fuente: propia

7.6.4 Índice de aplanamiento y alargamiento de la partícula de cuesco

Bajo el apoyo de la norma INVE E-230-13, la cual describe el procedimiento que permite determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de un material, se procedió a trabajar una muestra del cuesco para dos procedimientos subsiguientes. Inicialmente fue dividida la muestra en secciones a través del uso de tamices, luego cada fracción es pasada por la criba designada para este ensayo, la cual corresponde a un tamiz con barras paralelas separadas a 1/4", y quienes pasen el tamiz fueron consideradas como planas.

Para el ensayo de alargamiento, luego de haber dividido la muestra de cuesco en secciones, se procedió a utilizar un calibrador de longitudes compuesto de unas barras verticales separadas a distancias de 1/4", y una vez pasada la partícula se consideró que fuera alargada siempre y cuando quedara retenida.

Figura 18. Índice de aplanamiento y alargamiento de la partícula de cuesco



Fuente: propia

7.7 Metodología de aplicación del AEMO

En (Jiménez, 2017) se exponen las fases necesarias para la formulación, desarrollo y programación del AEMO para la optimización mezclas de los apiques de suelo. Con respecto a los cálculos de optimización, se usó como base el AEMO desarrollado por (Jiménez et al., 2019), el cual puede ser utilizado para otro tipo de residuo que se le quiera dar un desempeño específico. Para el presente trabajo se evaluará el cuesco procedente de la explotación de la palma de aceite y se comprobará su posible aplicación como material para afirmado en vías terciarias.

Para la creación del AEMO se tuvo en cuenta los valores de la granulometría, el índice de plasticidad y el CBR, ya que estos parámetros son fundamentales en las exigencias de la norma INVÍAS para afirmados.

El aporte de los autores en relación con el desarrollo del AEMO corresponden a: Incorporar la parte de la gestión ambiental a los datos que arroja el algoritmo, brindándole valores a los impactos ambientales generados por la producción de cal, cemento y el cuesco.

7.7.1 Función objetivo y Restricciones del Problema de Optimización

Para este proyecto, se desea obtener solución a un problema de optimización del material residual, cumpliendo tres premisas principales. Las cuales son: 1) encontrar la fracción adecuada de uno o más aditivos que permitan aumentar el CBR, con un valor mínimo según lo establecido

por INVÍAS para afirmado. 2) ajustar la granulometría del material, cumpliendo con los requisitos mínimos establecidos en la misma y iii) mejorar la plasticidad, lo cual estaría directamente reflejado en un aumento de la capacidad de soporte. Lo anterior define un problema multiobjetivo, el cual requiere maximizar el CBR y minimizar los costos asociados al incremento del CBR. Una primera aproximación del modelo matemático del problema multiobjetivo queda de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \text{Min: } C_t = \sum c_i * x_i \\ \text{Max: } CBR_t = \sum CBR_i * x_i \end{cases}$$

Donde C_t y CBR_t son los costos y CBR totales respectivamente, debido a la suma de los costos de cada uno de los materiales (c_i) y CBR_i , que componen las fracciones de mezcla final (x_i). Las restricciones se definen a continuación.

7.7.1.1 Restricción por tamaño de partícula.

La tabla 1 evidencia los límites del porcentaje de material que pasa por cada tamaño de tamices para que pueda ser considerado apto para afirmado.

Tabla 1. Límite inferior y superior granulométrico para afirmado.

TAMIZ	A 38	
	LIM SUP	LIM INF
1 1/2"	100	100
1"	100	100
3/4"	100	80
1/2"	100	80
3/8"	85	60
4	65	40
10	50	30
40	30	13
200	18	9

Fuente: propia.

En este orden, las restricciones de tamaño de partículas en la mezcla deben cumplir las siguientes condiciones:

$$z_1=100, \text{ entonces } y_1=0$$

$$80 \leq z_2 \leq 100$$

$$60 \leq z_3 \leq 85$$

$$40 \leq z_4 \leq 65$$

$$30 \leq z_5 \leq 50$$

$$13 \leq z_6 \leq 30$$

$$9 \leq z_7 \leq 18$$

Donde z es el porcentaje de material pasante para cada número de malla (j) representado en la tabla. Estos valores se obtienen del porcentaje de material que queda retenido en cada uno de los tamices, según la siguiente relación:

$$Z_j = 100 - \sum y_j$$

Donde (y) es el porcentaje de material retenido según tamaño de partícula (j) definido por el número del tamiz, los cuales son obtenidos en el laboratorio.

7.7.1.2 Restricción por composición.

Las sumas de las fracciones de material que componen la muestra deben sumar la unidad, es decir que:

$$\sum x_i = 1$$

Donde x_i es la fracción de cada material que hace parte de la mezcla mejorada. Para este caso, se tiene en cuenta el cemento y la cal para aumento de CBR, por lo tanto, x_1 es la fracción de cal, x_2 es la fracción de cemento y x_3 es la fracción de material de cuesco con granulometría ajustada. Como la capacidad portante del suelo depende del contenido de aditivos, es relevante definir un valor de CBR en función a estos. Como se observa en la tabla 2 y 3.

Tabla 2. Valoración del CBR para aditivos porcentuales de cal.

% CAL	CBR
1	14
2	25
3	40

Fuente: (IECA, 2008).

Tabla 3. Valoración del CBR para aditivos porcentuales de cemento.

% CEMENTO	CBR
2	86-89
3	94
4	98

Fuente: (IECA, 2008).

Hay una relación del CBR con el porcentaje de aditivo, de los que se puede obtener una función lineal independiente, así:

$$\begin{aligned} \text{CBR}_{\text{cal}} &= 10(\% \text{cal}) + 5 \\ \text{CBR}_{\text{cem}} &= 4(\% \text{cem}) + 82 \end{aligned}$$

De donde se obtiene el CBR_{Total}:

$$\text{CBR}_{\text{Total}} = \% \text{cal} / (\% \text{cal} + \% \text{cem}) * [10(\% \text{cal}) + 5] + \% \text{cem} / (\% \text{cal} + \% \text{cem}) * [4(\% \text{cem}) + 82]$$

De los valores obtenidos de fracciones para cal y cemento, se puede calcular la fracción de x3, con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} x1 &= \% \text{cal} / 100, \\ x2 &= \% \text{cem} / 100, \\ x3 &= (100 - \% \text{cal} - \% \text{cem}) / 100 \end{aligned}$$

7.7.1.3 Restricción por índice de plasticidad

De acuerdo a lo establecidos por la norma INVÍAS, el índice de plasticidad debe estar en el intervalo de 4% y 9% para material de afirmado. Para el cemento y la cal, también se tiene una relación del porcentaje añadido, el LL, LP Y IP, como se observa en la tabla 4 y 5.

Tabla 4. Valores de índices de consistencia para aditivos porcentuales de cal.

CAL	LÍMITE LIQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
1	64	40	24
2	62	47	15
3	59	48	11

Fuente: (IECA, 2008).

Tabla 5. Valores de índices de consistencia para aditivos porcentuales de cemento.

CAL	LÍMITE LIQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
1	64	40	24
2	62	47	15
3	59	48	11

Fuente: (Garzón et al., 2006).

Se puede representar una relación lineal del porcentaje de cal y cemento con respecto al IP, representado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} IP &= - 6,5(\%cal) + 30 \text{ para la cal} \\ IP &= 0,38(\%cem) + 8,62 \text{ para el cemento} \end{aligned}$$

De donde se obtiene el IPT:

$$IPT = \%cal/(\%cal+\%cem)* [- 6,5(\%cal) + 30] + \%cem/(\%cal+\%cem)* [0,38(\%cem) + 8,62]$$

Al igual que el CBR, el índice de plasticidad depende de los porcentajes de cal y cemento en la mezcla, con una restricción basada en la norma para una cantidad de porcentual de cal y cemento en la mezcla, así:

$$4 \leq IP \leq 9$$

7.7.1.4 Restricción por costo.

El costo de la mezcla final también es una restricción por la disponibilidad de recursos. Es decir, se cuenta con una cantidad de dinero disponible para la adquisición de los aditivos y el material para ajustar la granulometría; este dinero puede no ser suficiente para contar con las cantidades ideales de material complementario. Sin embargo, para este trabajo se calcula las cantidades óptimas sin tener en cuenta la restricción por costo, pero se incluyen los costos unitarios de los aditivos y el material complementario para mejorar la granulometría del material inicial para describir la función objetivo del costo total (CT). A continuación, se evidencia en la tabla 6 los valores del costo de cada aditivo y el material de cuesco para ajustar la granulometría.

Tabla 6. Costos unitarios de los aditivos y el material seleccionado.

Ci	CAL	CEMENTO	CUESCO
Costo unitario (\$/kg)	699	567	150

Fuente: propia.

Con el análisis planteado, se puede tener el siguiente problema multiobjetivo

- Funciones Objetivo:

$$\begin{cases} \text{Min: } CT = \sum ci * xi \\ \text{Max: } CBRT = x1/(x1+x2) * [1000x1 + 5] + x2/(x1+x2) * [400x2 + 82] \end{cases}$$

- Restricciones:

$$\begin{aligned} z1 &= 100 \\ 80 &\leq z2 \leq 100 \\ 60 &\leq z3 \leq 85 \\ 40 &\leq z4 \leq 65 \\ 30 &\leq z5 \leq 50 \\ 13 &\leq z6 \leq 30 \\ 9 &\leq z7 \leq 18 \end{aligned}$$

$$\sum xi = 1$$

$$4 \leq IP \leq 9$$

7.7.2 Población inicial y tamaño de la población

La población inicial se obtiene a través de la agrupación aleatoria de datos, de acuerdo a las proporciones de cal y cemento mínima requeridas para mejorar las propiedades mecánicas del cuesco. Para ello se tomaron 10.000 pares entre 0 y 0,04 (Y. Jiménez, 2017).

7.7.3 Generación de las fracciones de cal y cemento

Las fracciones de cal y cemento se generan aleatoriamente y con base a las funciones objetivo y las restricciones mencionadas anteriormente (Y. Jiménez, 2017).

7.7.4 Funciones de penalización para IP

Las funciones de penalización para problemas de optimización, se emplean para penalizar las soluciones que violenten las restricciones (Y. Jiménez, 2017). En el presente trabajo, se eliminan los valores que estén por debajo o por encima de los rangos de índice de plasticidad para afirmado establecidos por INVÍAS, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de IP para Afirmado.

USO	RANGO DE IP
Afirmado	4-9

Fuente: propia.

7.7.5 Elitismo

Tal como se mencionó en el marco teórico, el término elitismo protege al mejor individuo entre una generación y otra, durante el proceso evolutivo, lo cual se torna uno de los factores más importantes para el diseño del algoritmo. Es por ello que en el algoritmo se reordenan los valores con el fin de buscar el costo mínimo con mayor valor de CBR (Y. Jiménez, 2017).

7.7.6 Operadores Genéticos

Los operadores genéticos utilizados en el algoritmo son: selección, cuya técnica utilizada es la aleatoria o ruleta, con el fin de recoger los padres aleatoriamente para recombinarlos y generar nuevos hijos y el elitismo con un valor del 1% (Y. Jiménez, 2017).

7.7.7 Evaluación de las restricciones

Las restricciones se generan en base a los límites establecidos por la norma INVÍAS para afirmado. Esto es teniendo en cuenta los valores mínimos de CBR e Índice de plasticidad mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Valores de CBR e IP para Afirmado.

USO	CBR (%)	RANGO DE IP (%)
Afirmado	>15	4-9

Fuente: propia.

7.7.8 Criterio de parada

Como criterio de parada del algoritmo se estableció un número máximo de 150 generaciones (Jiménez, 2017).

7.8 Metodología para la identificación y estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.

Para llevar a cabo dicha metodología, se realizó una revisión bibliográfica sobre los estudios de impactos ambientales del cuesco, cemento y cal. Los documentos destacados fueron los de (Atencia, 2014), (Chávez, 2017) y (Castro & Guío, 2004). Posteriormente, se propone una estandarización de la importancia del impacto ambiental para incorporarlo en el AEMO y definir cuál es la mezcla óptima que menos afecta al medio ambiente.

7.8.1 Identificación de los impactos ambientales en la producción del cuesco.

Para la identificación de los impactos ambientales, (Atencia, 2014) procedió a elaborar una Matriz de Aspectos Ambientales (MAA). Los aspectos ambientales identificados en las actividades del proceso fueron evaluados, a partir de la siguiente ecuación matemática que relaciona en forma aditiva la probabilidad de ocurrencia del aspecto con su capacidad potencial de daño al medio ambiente a la salud humana, multiplicado por el tipo de control que sobre el proceso tiene la organización y el valor correspondiente al grado de cumplimiento de la normatividad.

$$I = (Po + Pd) * Co + L$$

En donde,

I = Aspecto Ambiental (Cualquier elemento de una actividad que puede interactuar con el medio ambiente. ISO 14.001, 2004)

- **Po= Probabilidad de Ocurrencia.** Se mide a través de una escala de 1 a 4 para determinar el grado de control que se puede tener, así:
 - 1 = Puede ocurrir el evento solamente en condiciones extremas.
 - 2 = Puede ocurrir en condiciones anormales o especiales (sabotaje o fallas técnicas o mecánicas).
 - 3 = Puede ocurrir por falta de capacitación del operario o descuido de éste.
 - 4 = Ocurre bajo condiciones normales de operación.

- **Pd: Probabilidad de Daño.** El cual se mide a través de una escala de 0 a 3 así:
 - 0 = Sin impacto detectable al medio ambiente, a la salud o seguridad humana.
 - 1 = Tiene un impacto mínimo al medio ambiente o a la salud, el impacto es remediable y no causa mayores daños o costos
 - 2 = Tiene un impacto limitado o de corto plazo para la salud o medio ambiente, relativamente fácil de prevenir, pero costoso de remediar, requiere controles para prevenir su ocurrencia.
 - 3 = Tiene un impacto directo o dañino al medio ambiente o la salud humana o cuando no conocemos lo suficiente para evaluar el daño.

- **Co: Controles Operativos.** Estos controles son manejados a través de una escala de 1 a 3 así:
 - 1 = Cuando la organización tiene implementado un control sobre el aspecto ambiental asociado a una actividad.
 - 2 = Cuando la organización tiene control parcial sobre un aspecto ambiental determinado.

3 = Cuando la organización no tiene ningún control sobre aspectos ambientales asociados a sus actividades.

- **L: Leyes Aplicables.** Esta variable se maneja en el rango de 1 a 3:

1 = Cuando la organización está cumpliendo con las leyes aplicables a un aspecto ambiental asociado.

2 = Cuando la organización está en proceso con el cumplimiento legal asociado a un aspecto ambiental analizado.

3 = Cuando la organización no cumple con la legislación ambiental aplicable a un aspecto ambiental.

Para determinar la relevante importancia del aspecto ambiental (I) se concluye que:

- Cuando I sea menor o igual a 6 no requiere programa de mitigación. En este caso, se fomenta el seguimiento de cada procedimiento por parte del departamento Ambiental.
- Cuando I sea mayor que 6 pero menor de 12, requiere de controles mínimos para reducir su potencia impacto. Se revisa la implementación de cada procedimiento, la experiencia del operario que lo ejecuta y se hacen capacitaciones y sensibilizaciones.
- Cuando I sea mayor que 12 pero menor que 18, el aspecto que genera el potencial impacto, requiere: identificación de los puntos críticos en el proceso para tomar las medidas de control asociados. Se identifica en qué tarea dentro de una actividad se está fallando y el porqué: fallas mecánicas, de conocimiento, procedimiento e instructivos no reflejan la secuencia de la actividad.
- Valores entre 18 y 24 requieren entrenamiento apropiado del personal involucrado en las actividades asociadas con estos.

Los impactos ambientales (negativos o positivos) asociados a los aspectos ambientales identificados en el proceso extractivo, son calificado de acuerdo a la metodología de evaluación de impacto ambiental de Conesa-Fernández (1993).

7.8.2 Identificación de los impactos ambientales en la producción de cal.

(Castro & Guío, 2004), implementó la metodología de Calificación Ecológica, la cual evalúa en forma cuantitativa las consecuencias de los impactos ambientales. La calificación de esta metodología está expresada por la suma ponderada de los siguientes criterios cualitativos:

$$CE = +/- (Pr * (a * De * Ma + b * Du))$$

Donde,

$$a = 0.7 \text{ y } b = 0.3$$

- **a y b** son factores ponderación constantes de los criterios de Desarrollo y Magnitud.
- **Clase (CI):** Asigna el signo de cada indicador calificado.
- **Presencia (Pr):** Califica la certeza o probabilidad de que el impacto pueda ocurrir, con los siguientes rangos de calificación:

Tabla 9. Presencia del impacto ambiental.

RANGO	VALORACIÓN
Cierto	1
Muy probable	0.7 – 0.9
Probable	0.4 – 0.6
Poco Probable	0.1 – 0.3

Fuente: propia.

- **Desarrollo (De):** Cuantifica la velocidad de presencia del impacto ambiental y se califica mediante los siguientes rangos:

Tabla 10. *Desarrollo del impacto.*

RANGO	VELOCIDAD DEL PROCESO (MESES)	VALORACIÓN
Muy rápido	<1	0.9-1
Rápido	1-5	0.7-0.8
Medio	6-12	0.5-0.6
Lento	13-24	0.3-0.4
Muy lento	>24	0.1-0.2

Fuente: propia.

- **Duración (Du):** Califica el período de existencia del impacto y sus consecuencias; y los rangos de calificación son los siguientes:

Tabla 11. *Duración del impacto.*

RANGO	VELOCIDAD DEL PROCESO (AÑOS)	VALORACIÓN
Muy larga	<10	9-10
Larga	7-9	7-9
Media	4-6	4-6
Corta	1-3	1-3
Muy corta	<1	<1

Fuente: propia.

- **Magnitud (Mg):** Califica la dimensión o tamaño del cambio ambiental directo o indirecto producido sobre un indicador ambiental y el rango de calificación es el siguiente:

Tabla 12. *Magnitud del impacto.*

RANGO	DIMENSIONES (%)	VALORACIÓN
Muy larga	80-100	9-10
Larga	60-70	7-8
Media	40-50	5-6
Corta	20-30	3-4
Muy corta	0-10	1-2

Fuente: propia.

Rangos de calificación matriz ecológica:

Tabla 13. *Rangos de calificación de la matriz ecológica.*

RANGO	VALORACIÓN
Muy alto	9-10
Alto	7-8
Medio	5-6

Bajo	3-4
Muy bajo	1-2

Fuente: propia.

7.8.3 Identificación de los impactos ambientales en la producción de cemento.

(Chávez, 2017), utilizó el método RIAM (Rapid Impact Assessment Matrix), permite que los datos de diferentes componentes sean analizados contra criterios comunes, dentro de una misma matriz, ofreciendo una evaluación rápida y clara de los impactos.

Los criterios de evaluación se ubican en dos grupos principales: (A) Criterios relacionados con la importancia de la condición y que pueden cambiar individualmente la puntuación obtenida. (B) Criterios que son de valor para la situación, pero que individualmente no son capaces de cambiar la puntuación obtenida. El valor adscrito a cada uno de estos grupos de criterios es determinado por el uso de una serie de fórmulas simples. Estas fórmulas permiten cuantificar de una manera incuestionable, la puntuación que añaden componentes individuales.

El sistema requiere la multiplicación de las puntuaciones dadas a cada uno de los criterios del grupo (A). El uso de multiplicadores para el grupo (A) es importante pues asegura que el peso de cada puntuación sea expresado, ya que la simple suma de puntuaciones podría arrojar resultados idénticos para condiciones diferentes.

Para obtener la puntuación de los criterios del grupo (B), los valores se adicionan como una suma. Esto asegura que los valores individuales no puedan influenciar la puntuación final, teniendo en cuenta solo su importancia combinada. La suma del grupo (B) es entonces multiplicada por el resultado del grupo (A) para proveer el resultado final de la evaluación (ES) para cada condición. El proceso puede ser expresado:

$$(a1) \times (a2) = aT$$

$$(b1) + (b2) + (b3) = bT$$

$$(aT) \times (bT) = ES$$

Donde,

- (a1) y (a2) son las puntuaciones individuales de los criterios para el grupo (A)
 - (b1) a (b3) son las puntuaciones individuales de los criterios para el grupo (B)
 - aT es el resultado de la multiplicación de todas las puntuaciones de (A)
 - bT es el resultado de la suma de todas las puntuaciones de (B)
 - ES es el puntaje final del impacto.
- Criterios del grupo (A):
- **(A1) Importancia de la condición.** Una medida de la importancia de la condición, es que es evaluada contra las fronteras espaciales o intereses humanos que afectará. Las escalas son definidas:
 - 4= Importante para intereses nacionales/internacionales.
 - 3= Importante para intereses regionales/nacionales.
 - 2= Importante para áreas inmediatamente fuera de la condición local.
 - 1= Importante solo para la condición local.
 - 0= Sin importancia.
 - **(A2) Magnitud del cambio/efecto.** Magnitud definida como una medida de la escala de beneficio/perjuicio de un impacto o una condición:
 - +3= Gran beneficio.
 - +2= Mejora significativa del status quo.
 - +1= Mejora del status quo.
 - 0= Sin cambio.
 - 1= Cambio negativo en el status quo.
 - 2= Cambio negativo significativo.

-3= Gran perjuicio o cambio.

-Criterios del grupo (B):

- **(B1) Permanencia.** Define si una condición es temporal o permanente, y debe ser visto solo como una medida del estado temporal de la condición 1= Sin cambio/no aplicable.

2= Temporal.

3= Permanente.

- **(B2) Reversibilidad.** Define si la condición puede ser cambiada y es una medida del control sobre el efecto de la condición. No debe ser confundido con permanencia. 1= Sin cambio/no aplicable.

2= Reversible.

3= Irreversible.

- **(B3) Acumulación.** Es una medida donde se evalúa si el efecto tendrá un impacto simple directo o si habrá un efecto acumulativo en el tiempo o un efecto sinérgico con otras condiciones. El efecto acumulativo es una forma de juzgar la sustentabilidad de una condición, y no debe ser confundido con una situación permanente o irreversible.

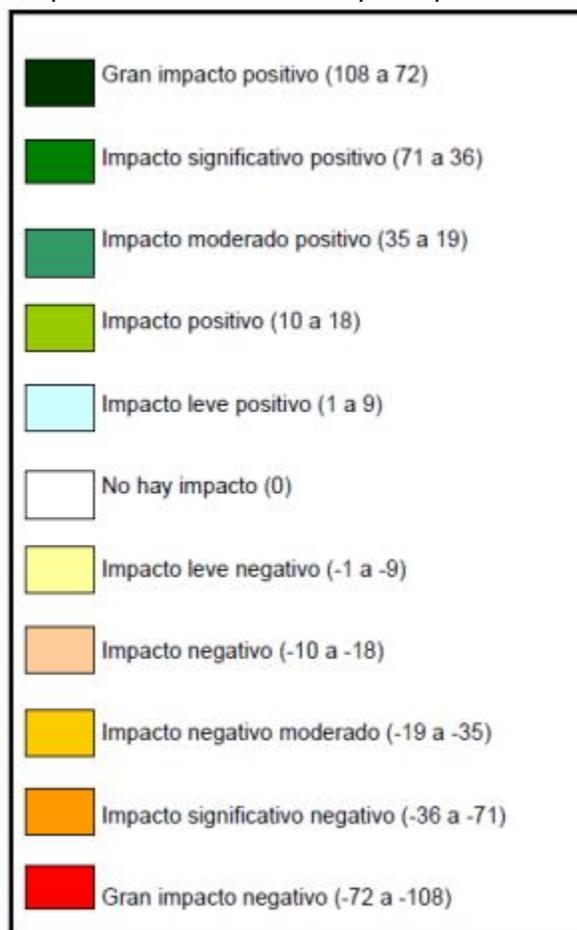
1= Sin cambio/no aplicable.

2= No acumulativo/simple.

3= Acumulativo/sinérgico.

La interpretación los valores obtenidos se logran mediante la aplicación de la tabla 14.

Tabla 14. Escala de Comparación para la Valoración de los Impactos por el Método RIAM.



Fuente: propia.

7.8.4 Estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.

Se propone una estandarización de las evaluaciones de impacto ambiental expuestas bibliográficamente por (Atencia, 2014), (Chávez, 2017) y (Castro & Guío, 2004), para el material del cuesto, cemento y cal respectivamente; con el fin de incorporarlo al AEMO y definir cuál es la mezcla que optimiza los costos, valor de CBR, Índice de plasticidad y el impacto al medio ambiente.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Resultados de la caracterización del suelo

En la tabla 15, se muestra la distribución de tamaños de partículas de las muestras de suelo estudiado; con respecto a la cantidad de material grueso, se observa que el apique 1 posee el 78,7% de este material, el apique 2 un 88,1%, el apique 3 el 89,2% y el apique 4 un 78,8% del mismo. En cuanto a la cantidad de arenas, el apique 1 y 4 comparten el mismo valor de 21,1%, mientras que el apique 2 y 3 presentan una cifra de 11,8 y 10,7% respectivamente. El porcentaje de materiales finos fue muy bajo, el apique 1 y 2 tuvieron un valor de 0,2% y el apique 3 y 4 una cifra de 0,1%.

Tabla 15. Distribución granulométrica de los apiques de suelo.

Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	% Gravas	% Arenas	% Finos	Tipo de material	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
Apique 1	1006	1	78,7	21,1	0,2	Grava bien graduada	A-1-a	GW
Apique 2	1292	1	88,1	11,8	0,2	Grava bien graduada	A-1-a	GW
Apique 3	1118	1	89,2	10,7	0,1	Grava bien graduada	A-1-a	GW
Apique 4	1930	1	78,8	21,1	0,1	Grava mal graduada	A-1-a	GP

Fuente: propia.

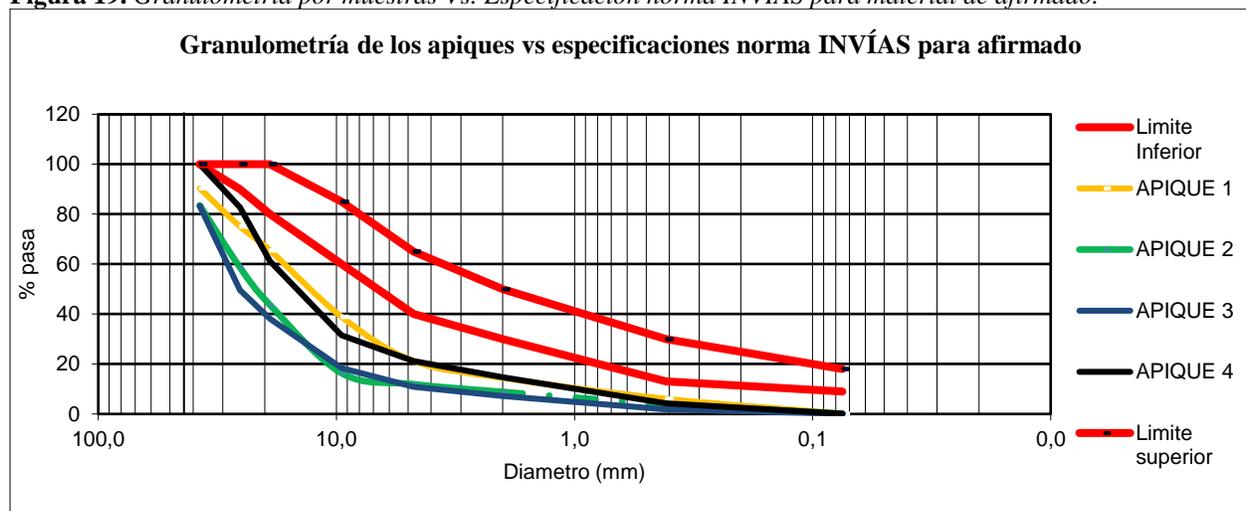
En la figura 19, se observan líneas demarcadas con color rojo, la cual representan el límite superior e inferior de porcentajes mínimos de partículas para que puedan cumplir como afirmado. De lo anteriormente mencionado, se obtiene que los apiques de suelo no cumplen con las especificaciones de INVÍAS ya que no entran entre los rangos requeridos (tabla 16).

Tabla 16. Límite inferior y superior granulométrico para afirmado.

TAMIZ	A 38	
	LIM SUP	LIM INF
11/2"	100	100
1"	100	100
3/4"	100	80
1/2"	100	80
3/8"	85	60
4	65	40
10	50	30
40	30	13
200	18	9

Fuente: propia.

Figura 19. Granulometría por muestras Vs. Especificación norma INVÍAS para material de afirmado.



Fuente: propia.

La tabla 17, resume los resultados de los límites de consistencia de las partículas de grano fino de cada uno de los apiques de suelo al ser mezclados con el agua. En relación al IP, se evidencia que en los cuatro apiques de suelo no se sobrepasó el 1% de IP, sus valores fueron 0.46%, 0.29%, 0.41% y 0.55% respectivamente para cada una de las muestras ensayadas. El material de los apiques por muy poco tienden a ser No plásticos.

Las especificaciones INVÍAS-13 establecen un valor de LL máximo de 40%, mientras que el IP máximo para los mismos materiales está entre 4% y 9% para los agregados como material de

afirmado. De acuerdo con lo anterior, en la tabla 17, los apiques de suelo sólo cumplen con el porcentaje máximo de límite líquido para material de afirmado. Sin embargo, en lo que respecta al IP, ningún apique cumplirá con lo especificado para material de afirmado exigido por la norma.

Tabla 17. Resultados de Límites de consistencia del suelo.

Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	Límite Líquido (LL) (%)	Límite Plástico (LP) (%)	Índice de Plasticidad (%)	INVÍAS (<40% LL)	INVÍAS (4%-9% IP)
Apique 1	3000	1	19,57	19,11	0,46	Cumple	No cumple
Apique 2	3000	1	16,04	15,75	0,29	Cumple	No cumple
Apique 3	3000	1	18,31	17,90	0,41	Cumple	No cumple
Apique 4	3000	1	17,54	16,99	0,55	Cumple	No cumple

Fuente: propia

La tabla 18, muestra los resultados de resistencia al desgaste en la Máquina de los Ángeles, los apiques de suelos analizados presentan valores entre 18,8% y 21,6%, lo cual indica que es un material resistente, durable a la abrasión y por tanto no sufrirá degradación o desintegración una vez sea sometido a las cargas del tránsito. Así mismo, estas muestras cumplen con la exigencia de la norma INVÍAS-13, mostrando un valor por debajo del máximo exigido para material de afirmado que es de 50%.

Tabla 18. Resultados de desgaste en la máquina de los Ángeles.

Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	Resistencia al desgaste (%)	INVÍAS (<50% RD)
Apique 1	5000	1	18,8	Cumple
Apique 2	5000	1	16,8	Cumple
Apique 3	5000	1	19,5	Cumple
Apique 4	5000	1	21,6	Cumple

Fuente: propia.

Los resultados del proctor modificado para los apiques de suelo se observan en la tabla 19, donde se evidencia que la humedad óptima fue de 11,5%, 9%, 8% y 7,5% respectivamente. En

base a la densidad seca máxima se observa que el valor del apique 1 fue de 2,12 gr/cm³, el apique 2 de 2,035 gr/cm³, el apique 3 con un valor de 2,15 gr/cm³ y 2,27 gr/cm³. El resultado de las humedades óptimas de cada una de las muestras se usó para la determinación del CBR de cada apique de suelo. La norma INVÍAS-13 exige un valor de CBR ≥ 15 para material de afirmado. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de determinar la capacidad de soporte admisible, así como su expansión.

En la tabla 19 se observa que a partir del ensayo de capacidad de soporte o CBR, los apiques 1 y 4 analizados tienen una capacidad de soporte excelente y es posible su uso como material de afirmado, ya que alcanza a cumplir con el requisito mínimo exigido por la norma INVÍAS, que es de $\geq 15\%$ (afirmado). En la caracterización de las muestras se observa una composición de gravas bien graduadas con consistencias altas, que coincide con la clasificación hallada con el ensayo de granulometría.

Tabla 19. Resultados de Densidad seca máxima, humedad óptima y %CBR compactado al 100% y 95%.

Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	Densidad seca máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	CBR compactado al 95%	CBR compactado al 100%	INVÍMA ($\geq 15\%$ CBR)
Apique 1	30000	1	2,12	11,5	38,52	63,85	Cumple
Apique 2	30000	1	2,035	9	N.A	N.A	N.A
Apique 3	30000	1	2,15	8	N.A	N.A	N.A
Apique 4	30000	1	2,27	7,5	30,57	60,60	Cumple

Fuente: propia

8.2 Resultados de la caracterización del cuesco

En la tabla 20, se visualiza la distribución de tamaños de partículas de la muestra del cuesco; en lo que corresponde a la fracción gruesa del material, este posee un 39,3%. En cuanto a la cantidad de arenas, un 53,5% y de materiales finos un 7,2%.

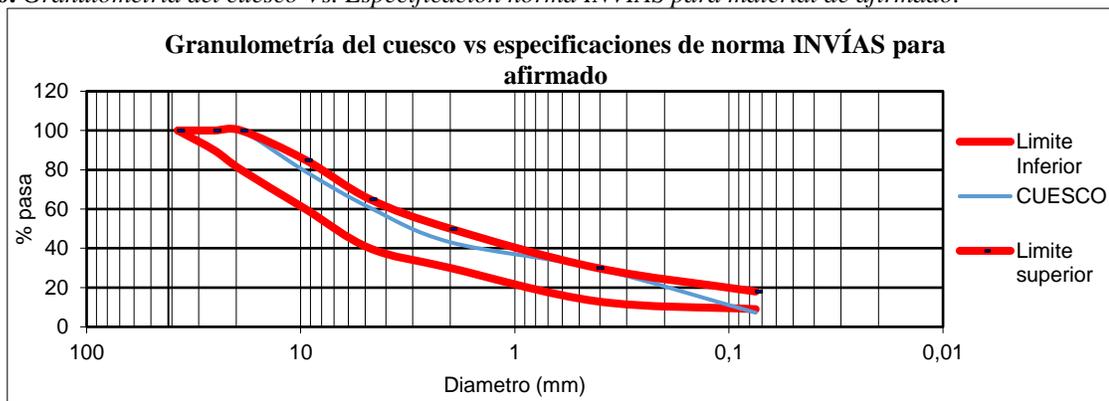
Tabla 20. Distribución granulométrica del cuesco.

Peso inicial	694		Peso final	694	
Tamiz (")	Tamiz mm	Peso	%ret	%ret acumulado	%pasa
2	50	0	0	0	100
1 1/2.	37,5	0	0	0	100
1	25	0	0	0	100
3/4.	19	0	0	0	100
3/8.	9,5	145	20,89	20,89	79,11
4	4,75	128	18,44	39,34	60,66
10	2	122	17,58	56,92	43,08
40	0,425	93	13,40	70,32	29,68
200	0,075	156	22,48	92,80	7,20
PT200		50	7,2	100	0
Total		694	100		

Fuente: propia.

En la Figura 20, las líneas demarcadas como límite superior e inferior muestran las franjas granulométricas dentro de las cuales deben estar la muestra del cuesco para cumplir como material para afirmado según las especificaciones del INVÍAS. La muestra del cuesco no cumple con los porcentajes mínimos indicados por la norma para material de afirmado (tabla 16).

Figura 20. Granulometría del cuesco Vs. Especificación norma INVÍAS para material de afirmado.



Fuente: propia.

Al cuesco no fue posible realizarle el ensayo de los límites de Atterberg, por lo tanto, se considera que es un material No plástico. También se efectuó el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles para 500 revoluciones donde se obtuvo un porcentaje de pérdida de 3,6% (tabla 21).

Este resultado, es aceptable ya que el porcentaje permitido es del 50% para las diferentes clases de tránsito, esto quiere decir que, “las partículas del material tienen una superficie muy resistente a la abrasión y desgaste que al interactuar con una acción mecánica no hay desprendimiento de partículas finas o fractura del mismo” (Becerra, 2017).

Tabla 21. Resultados de desgaste del cuesco en la máquina de los Ángeles.

Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	Resistencia al desgaste (%)	INVÍAS (<50% RD)
Cuesco	5000	1	3,6	Cumple

Fuente: propia.

Del mismo modo, se desarrolla el ensayo de geometría de las partículas, en donde se obtiene el índice de aplanamiento y alargamiento para el cuesco. Según la norma INVÍAS E-230 para que un material cumpla como base granular deberá tener un índice de alargamiento y aplanamiento máximo de 35%. La tabla 22 alberga los resultados obtenidos de la práctica, se constata que el índice de aplanamiento no cumple con la normatividad ya que está por encima del 35%; mientras que el índice de alargamiento si se encuentra dentro de los límites permitidos, con un valor de 3,58%.

Tabla 22. Resultados de índice de aplanamiento y alargamiento del cuesco.

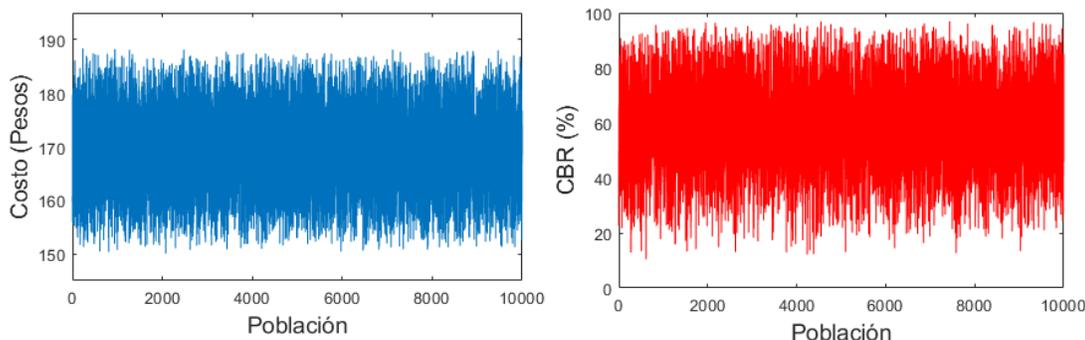
Muestra	Cantidad de material (g)	No. Ensayos	Índice de aplanamiento (%) (IA)	Índice de alargamiento (%) (IL)	INVÍAS (<35% IA)	INVÍAS (<35% IL)
Cuesco	1397	1	90,26	3,58	No cumple	Cumple

Fuente: propia.

8.3 Resultados del problema de optimización multiobjetivo

En la Figura 21, se observa que, los costos se encuentran entre los rangos de 150 a 190 \$/kg de material de cuesco, utilizado para la mezcla óptima, comprendiendo una media de 170 pesos; mientras que en la figura de al lado, el CBR arroja valores entre 20% y 90% con una media de 60%.

Figura 21. Convergencia de las funciones objetivo en las poblaciones evaluadas.



Fuente: propia.

Luego que la búsqueda de optimización lanzara valores razonables, se generó la curva de Pareto y las restricciones por índice de plasticidad para las funciones objetivo de los materiales para afirmado.

8.3.1 Restricción por ajuste granulométrico.

La combinación 20/80, es decir, 20% a los apiques de suelo y 80% de cuesco, ambos materiales procedentes de la extractora Sicarare S.A.S, cumple con los requisitos de distribución de tamaños de granos para todos los tamices.

Los nuevos valores del porcentaje que pasa de la combinación 20/80 se evidencia en la tabla 23; la cual señala que cumple con las condiciones granulométricas requeridas por la norma para material de afirmado.

Tabla 23. Resultados de la evaluación multiobjetivo para granulometría – afirmado.

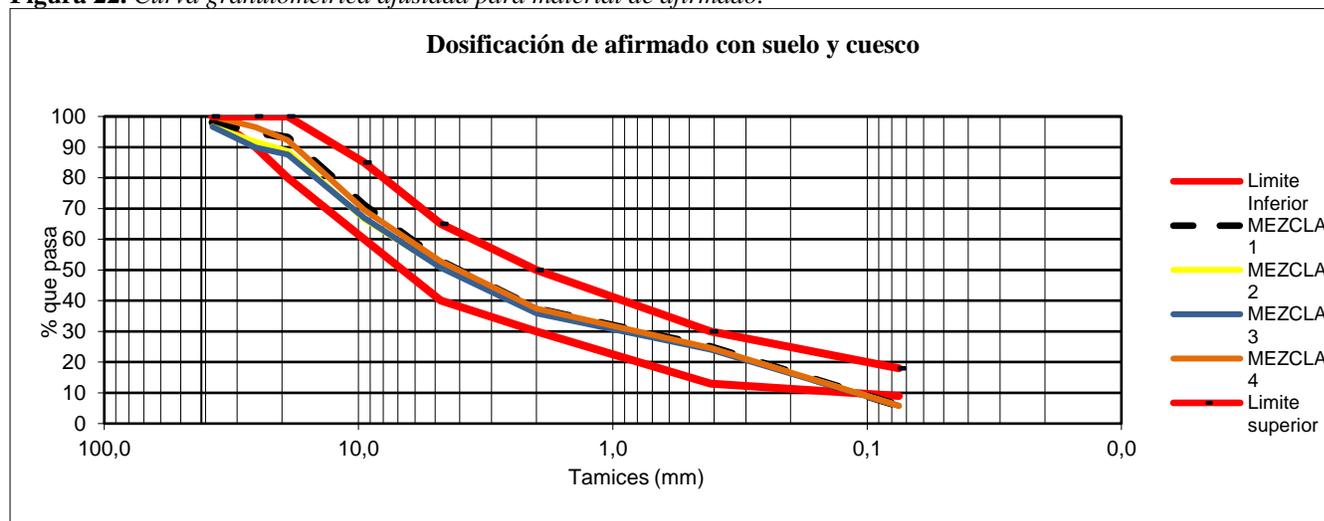
Tamiz (")	% pasa Ap1	% pasa Ap 2	% pasa Ap 3	% pasa Ap 4	% pasa Cuesco	% pasa 20/80 (Ap 1- Cu)	% pasa 20/80 (Ap 2- Cu)	% pasa 20/80 (Ap 3- Cu)	% pasa 20/80 (Ap 4- Cu)	Norma INVÍAS	Apreciación
2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	Cumple
1 1/2.	90,4	83,5	83,3	100,0	100,0	98,1	96,7	96,7	100,0	100,0	Cumple
1	75,1	58,7	49,6	82,7	100,0	95,0	91,7	89,9	96,5	-	Cumple
3/4.	65,5	43,7	38,1	61,1	100,0	93,1	88,7	87,6	92,2	80-100	Cumple
3/8.	38,9	16,3	18,3	31,5	79,1	71,1	66,5	66,9	69,6	60-85	Cumple
4	21,3	11,9	10,8	21,2	60,7	52,8	50,9	50,7	52,8	40-65	Cumple

10	14,4	8,8	7,2	14,7	43,1	37,3	36,2	35,9	37,4	30-50	Cumple
40	6,1	3,9	1,8	4,3	29,7	25,0	24,5	24,1	24,6	13-30	Cumple
200	0,2	0,2	0,1	0,1	7,2	5,8	5,8	5,8	5,8	9-18	No cumple

Fuente: propia.

La curva granulométrica de la mezcla 20/80 se aprecia en la figura 22.

Figura 22. Curva granulométrica ajustada para material de afirmado.

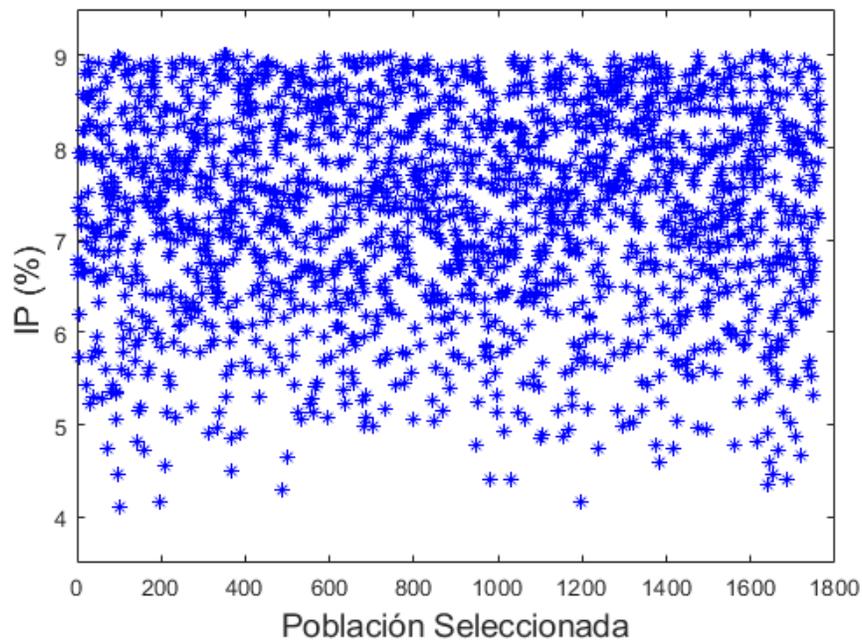


Fuente: propia.

8.3.2 Restricciones por IP

La figura 23 representa todos los datos que cumplen con la restricción IP para material de afirmado, lo que genera la certeza que la curva de Pareto cumple con las condiciones establecidas en la formulación del modelo de cálculo. En ella, se muestra que los valores cumplen con un índice de plasticidad entre 4 y 9%, lo cual ofrece garantías para el material de afirmado.

Figura 23. Individuos con valores de IP entre 4 y 9 para material de afirmado.

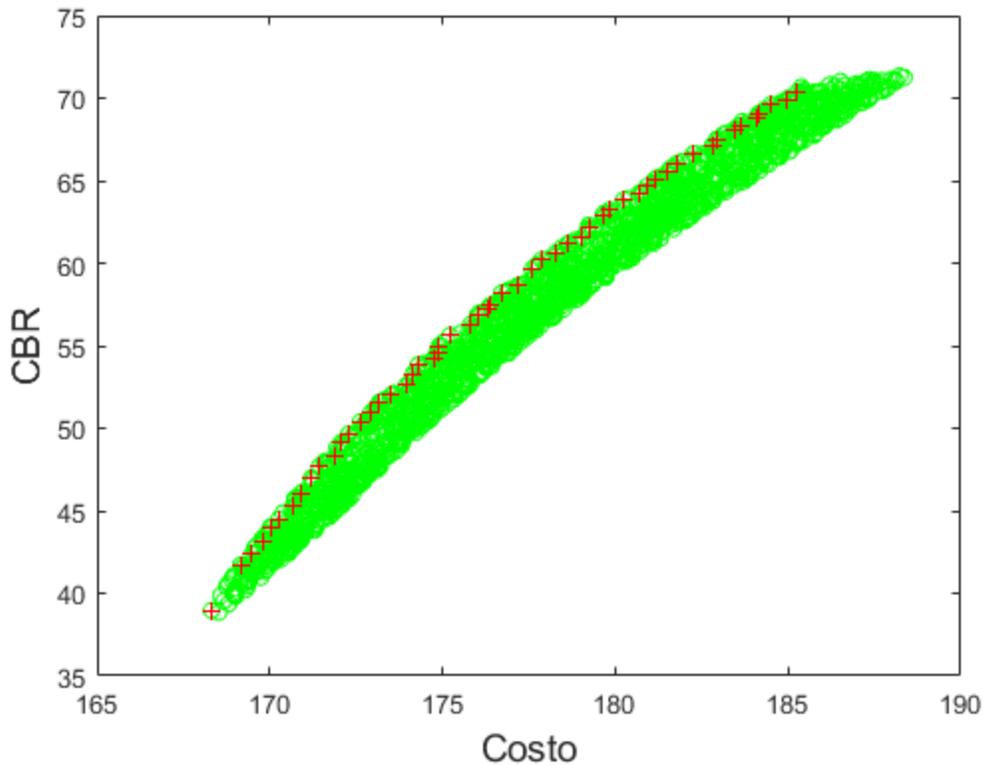


Fuente: propia.

8.3.3 Desarrollo de la Curva de Pareto para afirmado

Al finalizar la restricción del índice de plasticidad, se procede a la obtención de la curva de Pareto para el material de afirmado con los puntos óptimos hallados por el AEMO y sobre la cual se establece el valor de las variables y la mezcla ideal. En la figura 24, se evidencia la curva de Pareto, donde los puntos rojizos hacen parte de la frontera de Pareto o puntos óptimos obtenidos por el algoritmo y los puntos verdes a los posibles datos a adquirir.

Figura 24. Curva Pareto óptima de las F1 (CBR) y F2 (Costos) para Afirmado.



Fuente: propia.

La ilustración muestra una serie de cifras óptimas, entre los que puede ocurrir tres situaciones a saber: 1) que el evaluador requiera minimizar los costos, lo que acarrea que el CBR sea mínimo; 2) que busque un punto medio entre el CBR y los costos del material o 3) que el evaluador requiera aumentar el CBR, lo que implica aumentar los costos del material (Jiménez, 2017).

Lo anteriormente mencionado, se plasma en la tabla 24, con los resultados de las cantidades mínimas de cal y cemento necesarias para mejorar las propiedades mecánicas del cuesco y que cumpla con los requisitos mínimos de INVÍAS.

Tabla 24. Resultados de la evaluación multiobjetivo para material de afirmado.

ITEM	SITUACIÓN 1	SITUACIÓN 2	SITUACIÓN 3
Fracción Cal	0,03256	0,03336	0,03457
Fracción Cemento	0,0010	0,0212	0,0390
Mezcla 20/80	0,96639	0,94542	0,92646
CBR (%)	38,960	58,630	70,310

Costo (\$/kg)	168,313	177,165	185,228
IP (%)	8,829	8,748	8,890

Fuente: propia.

La tabla 24, evidencia que para todos los casos el porcentaje de cal es similar, lo que indica la tendencia a que el algoritmo de búsqueda, se incline por vincular cal en la mezcla ideal por factores económicos, teniendo en cuenta que el mejoramiento del CBR se realiza ya sea con cal o cemento, como materiales incluidos en el estudio; sin embargo, se nota que el cemento aumenta considerablemente el valor de la capacidad portante del suelo, como se observa en la situación 3, donde el CBR tiene el valor más alto de 70,310% pero con un 3,9% de cemento en la mezcla, por lo tanto, presenta la combinación más costosa de \$ 185,228 por cada kilogramo de cuesco.

8.4 Resultados de la identificación y estandarización de los impactos ambientales en la optimización de las mezclas propuestas.

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica.

8.4.1 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción del cuesco.

(Atencia, 2014) resume los impactos ambientales en la siguiente matriz de aspectos ambientales (MAA). Figura 25.

Figura 25. Valor de los impactos asociados al proceso extractivo.

Aspecto ambiental	Vr. Aspecto	Impacto ambiental	Vr. Impacto	Componente ambiental afectado
Consumo de combustible fósil	20	Cambio climático	37	Atmosférico
Consumo de energía eléctrica	20	Cambio climático	37	Atmosférico
Generación de calor	24	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Generación de ruido	7	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Consumo de energía	14	Cambio climático	40	Atmosférico
Consumo de agua	15	Agotamiento del recurso	33	Hídrico
Generación de efluentes	17	Contaminación aguas superficiales	32	Hídrico
Generación de calor	24	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Consumo de energía	17	Cambio climático	37	Atmosférico
Generación de residuos (Raquis)	14	Mejora de suelos (+)	30	Geosférico (+)
Consumo de energía	16	Cambio climático	37	Atmosférico
Generación de calor	24	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Consumo de agua	15	Agotamiento del recurso	33	Hídrico
Consumo de energía	14	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Generación efluentes	15	Contaminación aguas superficiales	32	Hídrico
Consumo de energía	14	Cambio climático	37	Atmosférico
Generación de residuos (Torta)	14	Alimento ganado (+)	40	Socioeconómico
Generación de residuos (Cuesco)	14	Generación de energía (+)	27	Atmosférico (+)
Generación de efluentes	15	Contaminación aguas superficiales	32	Hídrico
Consumo de agua	15	Agotamiento del recurso	33	Hídrico
Consumo de energía	14	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Consumo de agua	15	Agotamiento del recurso	33	Hídrico
Emisiones atmosféricas	22	Afectación salud humanos	24	Socioeconómico
Consumo de agua	15	Agotamiento del recurso	33	Hídrico

Fuente: (Atencia, 2014)

Los impactos ambientales (negativos, positivos) asociados a los aspectos ambientales identificados en el proceso extractivo, son calificado de acuerdo a la metodología de evaluación de impacto ambiental de Conesa-Fernández (1993).

Tabla 25. *Importancia de los impactos ambientales.*

Valor I	Calificación	Significado
<25	Bajo	La afectación del mismo es irrelevante en comparación con los fines y objetivos del Proyecto en cuestión
25≥<50	Moderado	La afectación del mismo, no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas.
50≥<75	Severo	La afectación de este, exige la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras o protectoras. El tiempo de recuperación necesario es en un periodo prolongado
≥75	Crítico	La afectación del mismo, es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales. NO hay posibilidad de recuperación alguna.

Fuente: (Conesa, 1993).

Al relacionar los resultados de la MAA de (Atencia, 2014) con la tabla de importancia de (Conesa,1993), el autor expone que existe 7 impactos que presentan una importancia baja mientras que 17 tienden a ser moderados. Lo que indica que el proceso de producción de cuesco es amigable con el medio ambiente, ya que no posee impactos severos o críticos.

8.4.2 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción de cal.

(Castro & Guío, 2004), sintetiza los impactos ambientales en la siguiente matriz de calificación ecológica. Figura 26 y 27.

Figura 26. Valor de los impactos asociados a la Matriz ecológica – Producción de cal.

CeI AP		Componente Atmosférico				Componente Litosférico		Componente Hidrosférico			Componente Biosférico			Componente Noosférico		
		Calidad				Suelo		Calidad			Paisaje	Flora	Fauna			
ACTIVIDADES DE LA PRODUCCION DE CAL	Criterios de evaluación	Emisiones de NOx, SOx y CO	Emisión de Material particulado	Olores ofensivos	Ruido	Usos del Suelo	Erosión	Color	Turbidez	Sólidos Totales (ST)	Calidad	Diversidad	Diversidad	Salud de los operarios		
		Recepción de materia prima e insumos	Cl	NEG	NEG		NEG	NEG	NEG				NEG	NEG	NEG	NEG
		Pr	1	1		1	1	1				1	1	1	0,6	
		Du	2	5		5	7	7				7	7	7	5	
		De	0,9	0,9		0,9	0,7	0,3				0,9	0,7	0,5	0,9	
		Mg	3	6		7	5	5				7	7	7	4	
		Subt	-2,49	-5,28	0	-5,91	-4,55	-3,15	0	0	0	-6,51	-5,53	-4,55	-2,41	
		Selección de materia prima	Cl	NEG	NEG		NEG	NEG	NEG				NEG	NEG	NEG	NEG
		Pr		1		1	1	1				1	1	1	0,5	
		Du		4		4	7	7				5	5	5	6	
		De		0,9		0,9	0,7	0,3				0,7	0,6	0,5	0,5	
		Mg		6		4	5	3				7	3	3	4	
		Subt	0	-4,98	0	-3,72	-4,55	-2,73	0	0	0	-4,93	-2,76	-2,55	-1,6	
		Disposición de estériles	Cl		NEG		NEG	NEG		NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG
		Pr		1		1	1		1	1	1	1	1	0,5	0,6	
		Du		5		4	8		7	7	7	9	9	9	7	
		De		0,9		0,9	0,9		0,8	0,8	0,8	0,9	0,7	0,4	0,4	
		Mg		5		3	5		1	1	1	7	7	5	2	
Subt	0	-4,65	0	-3,09	-5,55	0	-2,66	-2,66	-2,66	-7,11	-7,11	-2,05	-1,6			

Fuente: (Castro & Guío, 2004)

Figura 27. Continuación de la tabla de valores de los impactos asociados a la Matriz ecológica – Producción de cal.

	Enlajado	Cl													NEG	
		Pr														0,4
		Du														6
		De														0,2
		Mg														2
		Subt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.83
	Tendadas	Cl	NEG	NEG		NEG										NEG
		Pr		1		1										0,6
		Du		4		1										3
		De		0,9		0,9										0,5
		Mg		2		3										2
		Subt	0	-2.46	0	-2.19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.47
	Cocción (Cal viva)	Cl	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG
		Pr	1	1	1			0,8				1	1	1	1	1
		Du	9	9	9			9				9	8	8	9	9
		De	0,9	0,9	0,9			0,5				0,9	0,7	0,5	0,5	0,5
		Mg	9	9	8			8				9	7	7	7	7
		Subt	-8.37	-8.37	-7.74	0	0	-4.4	0	0	0	-8,37	-5.83	-4.85	-5.15	-5.15
Apagado de cal	Cl					NEG	NEG				NEG					
	Pr					1	0,8				1					
	Du					7	7				4					
	De					0,7	0,2				0,9					
	Mg					1	3				4					
	Subt	0	0	0	0	-3.88	-2.01	0	0	0	-3.72	0	0	0	0	

Fuente: (Castro & Guío, 2004)

Al comparar la matriz de calificación ecológica con los rangos de importancia de los impactos, se determina que existen 4 procesos relacionados con la cocción de la cal y 2 con la disposición de estériles que poseen Alto impacto al medio ambiente, 7 de Medio, 13 de Bajo y 16 de Muy Bajo. Las afecciones se producen por el material particulado, pero es controlable.

8.4.3 Resultados de la identificación de los impactos ambientales en la producción de cemento.

(Chávez, 2017) recopila los impactos ambientales en la siguiente matriz RIAM. Figura 28 y 29.

Figura 28. Valor de los impactos asociados a la Matriz RIAM-producción de cemento.

FASE	IMPACTOS AMBIENTALES	IMPORTANCIA	MAGNITUD	PERMANENCIA	REVERSIBILIDAD	ACUMULABILIDAD	TOTAL	CALIFICACIÓN
Operación	Incremento en los niveles de polvo debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Incremento en niveles de otros contaminantes debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Incremento en los niveles de ruido debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Modificación de la calidad de agua debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
	Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
	Efectos sobre la biodiversidad de flora debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Efectos sobre la biodiversidad de fauna debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Aumento de posibilidades de empleo debido a recepción de materia prima en puerto	1	1	2	2	2	6	Leve Positivo
	Incremento en los niveles de polvo debido a Almacenamiento de materias primas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Incremento en niveles de otros contaminantes debido a Almacenamiento de materias primas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Incremento en los niveles de ruido debido a Almacenamiento de materias primas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a Almacenamiento de materias primas	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
	Aumento de posibilidades de empleo debido a Almacenamiento de materias primas	1	1	2	2	2	6	Leve Positivo
	Incremento en los niveles de polvo debido a Molienda	2	2	2	2	2	24	Negativo Moderado
	Incremento en los niveles de ruido debido a Molienda	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Modificación de la calidad de agua debido a Molienda	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
	Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a Molienda	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
	Efectos sobre la biodiversidad de flora debido a Molienda	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Efectos sobre la biodiversidad de fauna debido a Molienda	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
	Aumento de posibilidades de empleo debido a Molienda	1	1	2	2	2	6	Leve Positivo

Figura 29. Continuación de la tabla de valores de los impactos asociados a la Matriz RIAM- producción de cemento.

Incremento en los niveles de polvo debido a separador de partículas	2	2	2	2	2	24	Negativo Moderado
Incremento en los niveles de ruido debido a separador de partículas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a separador de partículas	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
Efectos sobre la biodiversidad de flora debido a separador de partículas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Efectos sobre la biodiversidad de fauna debido a separador de partículas	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Aumento de posibilidades de empleo debido a separador de partículas	1	1	2	2	2	6	Leve Positivo
Incremento en los niveles de polvo debido a almacenamiento de cemento	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a almacenamiento de cemento	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Aumento de posibilidades de empleo debido a almacenamiento de cemento	1	1	2	2	2	6	Leve Negativo
Incremento en niveles de otros contaminantes debido a actividades de laboratorio	1	2	2	2	2	12	Negativo
Modificación de la calidad de agua debido a actividades de laboratorio	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
Modificación de la calidad de suelo por residuos sólidos debido a actividades de laboratorio	1	1	2	2	3	7	Leve Negativo
Aumento de posibilidades de empleo debido a actividades de laboratorio	1	1	2	2	2	6	Leve Positivo

Fuente: (Chávez, 2017).

Al correlacionar la matriz RIAM con la valoración de la importancia del impacto ambiental, se tiene que hay 5 impactos calificados como Leve Positivo, 25 Leve Negativo, 1 Negativo y 2 Negativo Moderado. Al igual que en el proceso de la producción de la cal, la cementera genera material particulado que afecta la salud humana y la calidad del aire. Pero son impactos que se pueden controlar con planes de acciones y mitigaciones. Por lo tanto, los impactos de la cal y el cemento son bajos y mitigables.

8.4.4 Resultados de la estandarización de los impactos ambientales en el AEMO para la optimización de las mezclas propuestas.

A partir de las evaluaciones de impacto ambiental del cuesco, el cemento y la cal, se estandariza el valor de la importancia ambiental para cada material y se incorpora a los datos que arroja el AEMO, lo anterior con el fin de determinar cuál es la mezcla que optimiza los costos, valor de CBR, Índice de plasticidad y el impacto al medio ambiente.

En la tabla 26, se observa los datos numéricos que arroja el AEMO a partir de la concentración de cal, cemento, valor del CBR, costos y el índice de plasticidad.

Tabla 26. Datos de salida del AEMO.

CAL	CEMENTO	CUESCO	CBR	COSTO	IP
0,03256	0,0010	0,96639	38,960	168,313	8,829
0,03231	0,0034	0,96428	41,712	169,162	8,975
0,03265	0,0037	0,96361	42,366	169,485	8,777
0,03269	0,0044	0,96290	43,169	169,786	8,756
0,03250	0,0052	0,96228	43,949	170,019	8,869
0,03263	0,0056	0,96172	44,511	170,270	8,796
0,03306	0,0061	0,96083	45,295	170,697	8,564
0,03271	0,0070	0,96025	46,047	170,893	8,762
0,03254	0,0080	0,95947	46,938	171,198	8,864
0,03253	0,0081	0,95942	46,997	171,217	8,871
0,03233	0,0089	0,95882	47,694	171,439	8,981
0,03292	0,0092	0,95793	48,306	171,890	8,682
0,03236	0,0103	0,95732	49,150	172,068	8,978
0,03237	0,0108	0,95680	49,648	172,287	8,980
0,03240	0,0116	0,95600	50,383	172,624	8,974
0,03255	0,0121	0,95533	50,925	172,924	8,907
0,03242	0,0129	0,95469	51,570	173,175	8,978
0,03281	0,0132	0,95399	52,003	173,519	8,800
0,03325	0,0137	0,95306	52,608	173,965	8,605
0,03297	0,0145	0,95253	53,194	174,147	8,755
0,03252	0,0155	0,95202	53,843	174,299	8,973
0,03319	0,0157	0,95113	54,260	174,760	8,680
0,03295	0,0162	0,95082	54,626	174,857	8,797
0,03259	0,0168	0,95060	54,991	174,904	8,966
0,03256	0,0176	0,94984	55,624	175,214	8,996
0,03321	0,0182	0,94859	56,289	175,820	8,733
0,03292	0,0190	0,94804	56,859	176,012	8,872

0,03320	0,0194	0,94740	57,217	176,316	8,767
0,03307	0,0197	0,94722	57,416	176,373	8,826
0,03286	0,0208	0,94633	58,203	176,718	8,940
0,03286	0,0208	0,94633	58,203	176,718	8,940
0,03336	0,0212	0,94542	58,630	177,165	8,748
0,03303	0,0227	0,94429	59,622	177,590	8,918
0,03303	0,0227	0,94429	59,622	177,590	8,918
0,03290	0,0235	0,94359	60,202	177,867	8,990
0,03330	0,0240	0,94268	60,635	178,296	8,848
0,03335	0,0248	0,94190	61,162	178,628	8,852
0,03377	0,0252	0,94104	61,544	179,045	8,701
0,03340	0,0261	0,94048	62,120	179,230	8,870
0,03326	0,0273	0,93945	62,894	179,639	8,957
0,03326	0,0273	0,93945	62,894	179,639	8,957
0,03328	0,0278	0,93894	63,227	179,853	8,964
0,03329	0,0287	0,93801	63,841	180,246	8,984
0,03372	0,0293	0,93703	64,261	180,710	8,849
0,03363	0,0299	0,93649	64,658	180,924	8,900
0,03355	0,0305	0,93595	65,049	181,139	8,947
0,03369	0,0312	0,93512	65,509	181,500	8,922
0,03357	0,0320	0,93439	66,036	181,790	8,989
0,03374	0,0330	0,93331	66,627	182,263	8,961
0,03416	0,0337	0,93211	67,146	182,819	8,841
0,03389	0,0344	0,93173	67,522	182,942	8,955
0,03419	0,0352	0,93063	68,036	183,442	8,881
0,03419	0,0357	0,93014	68,333	183,645	8,898
0,03445	0,0364	0,92920	68,763	184,073	8,836
0,03420	0,0369	0,92895	69,045	184,144	8,937
0,03412	0,0378	0,92805	69,622	184,506	8,998
0,03468	0,0382	0,92712	69,874	184,968	8,830
0,03457	0,0390	0,92646	70,310	185,228	8,890

Fuente: Propia.

En la tabla 27, 28 Y 29 se evidencia el resumen de los valores del impacto ambiental de la producción de cal, cemento y cuesco. Adicionalmente, la propuesta de categorización para el AEMO. Para la estandarización de los rangos de los impactos se plantea reducir 5 jerarquías a 3, a partir de la porcentualización de las cantidades de impactos nombrados en los EIA de cada autor. Los nuevos rangos de la importancia ambiental son: ALTO, MEDIO Y BAJO. Cada uno con una valoración para el AEMO de 3, 2 y 1 respectivamente.

Tabla 27. Valores del impacto de la cal y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.

RANGO	VALORACIÓN	CANTIDAD	PORCENTAJE	Propuesta del Impacto ambiental para el AEMO (cal)		Valoración del impacto
Muy alto	9-10	0	14,28	14,28% de 59 CASILLAS	Alto	3
Alto	7-8	6				
Medio	5-6	7	16,66	16,66% de 59 CASILLAS	Medio	2
Bajo	3-4	13	69,04	69,04% de 59 CASILLAS	Bajo	1
Muy bajo	1-2	16				
Total		42	100%	59 casillas		

Fuente: Propia.

Tabla 28. Valores del impacto del cemento y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.

RANGO	VALORACIÓN	CANTIDAD	PORCENTAJE	Propuesta del Impacto ambiental para el AEMO (cemento)		Valoración del impacto
Gran impacto negativo	-72 a -100	0	0	0% de 59 CASILLAS	Alto	3
Impacto significativo negativo	-36 a -71	0				
Impacto negativo moderado	-19 a -35	2	7,15	7,15% de 59 CASILLAS	Medio	2
Impacto negativo	-10 a -18	1	92,85	92,85% de 59 CASILLAS	Bajo	1
Impacto leve negativo	-1 a -9	25				
Total		28	100%	59 casillas		

Fuente: Propia.

Tabla 29. Valores del impacto de la cal y la propuesta del impacto ambiental para el AEMO.

RANGO	VALORACIÓN	CANTIDAD	PORCENTAJE	Propuesta del Impacto ambiental para el AEMO (cuesco)		Valoración del impacto
Crítico	≥ 75	0	0	0% de 59 CASILLAS	Alto	3
Severo	$50 \leq < 75$	0	70,83			
Moderado	$25 \leq < 50$	17		70,83	70,83% de 59 CASILLAS	Medio
Bajo	< 25	7	29,17	29,17% de 59 CASILLAS	Bajo	1
Total		24	100%	59 casillas		

Fuente: Propia.

El AEMO arrojó 59 datos que representa la muestra investigada para el contenido de cal, cemento, cuesco, CBR, costo e IP como evidencia la tabla 26. Cada casilla lleva asignada una

recategorización de valores y su rango dependerá del porcentaje de impactos hallados en los estudios de impacto ambiental anteriormente descritos. Ver tabla 30, 31 y 32.

Tabla 30. Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por la cal.

RANGO	VALORACIÓN	VALORACIÓN DEL AEMO	APRECIACIÓN
0,03412 a 0,03468	3	>5	Alto
0,03336 a 0,03389	2	4-5	Medio
0,03231 a 0,03335	1	≤3	Bajo

Fuente: Propia.

Tabla 31. Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por el cemento.

RANGO	VALORACIÓN	VALORACIÓN DEL AEMO	APRECIACIÓN
N.A	3	>5	Alto
0,0369 a 0,0390	2	4-5	Medio
0,0010 a 0,0364	1	≤3	Bajo

Fuente: Propia.

Tabla 32. Recategorización de valores del AEMO para el impacto ambiental producido por el cuesco.

RANGO	VALORACIÓN	VALORACIÓN DEL AEMO	APRECIACIÓN
N.A	3	>5	Alto
0,93945 a 0,96639	2	4-5	Medio
0,92646 a 0,93894	1	≤3	Bajo

Fuente: Propia.

En la tabla 33 se observa la estandarización de los impactos ambientales en el AEMO para la optimización de las mezclas propuestas.

Tabla 33. Estandarización de los impactos ambientales en el AEMO.

CAL	CEMENTO	CUESCO	CBR	COSTO	IP	VALOR IMPACTO AMBIENTAL	APRECIACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL
0,03256	0,0010	0,96639	38,960	168,313	8,829	4	Medio
0,03231	0,0034	0,96428	41,712	169,162	8,975	4	Medio
0,03265	0,0037	0,96361	42,366	169,485	8,777	4	Medio
0,03269	0,0044	0,96290	43,169	169,786	8,756	4	Medio
0,03250	0,0052	0,96228	43,949	170,019	8,869	4	Medio
0,03263	0,0056	0,96172	44,511	170,270	8,796	4	Medio
0,03306	0,0061	0,96083	45,295	170,697	8,564	4	Medio
0,03271	0,0070	0,96025	46,047	170,893	8,762	4	Medio
0,03254	0,0080	0,95947	46,938	171,198	8,864	4	Medio

0,03253	0,0081	0,95942	46,997	171,217	8,871	4	Medio
0,03233	0,0089	0,95882	47,694	171,439	8,981	4	Medio
0,03292	0,0092	0,95793	48,306	171,890	8,682	4	Medio
0,03236	0,0103	0,95732	49,150	172,068	8,978	4	Medio
0,03237	0,0108	0,95680	49,648	172,287	8,980	4	Medio
0,03240	0,0116	0,95600	50,383	172,624	8,974	4	Medio
0,03255	0,0121	0,95533	50,925	172,924	8,907	4	Medio
0,03242	0,0129	0,95469	51,570	173,175	8,978	4	Medio
0,03281	0,0132	0,95399	52,003	173,519	8,800	4	Medio
0,03325	0,0137	0,95306	52,608	173,965	8,605	4	Medio
0,03297	0,0145	0,95253	53,194	174,147	8,755	4	Medio
0,03252	0,0155	0,95202	53,843	174,299	8,973	4	Medio
0,03319	0,0157	0,95113	54,260	174,760	8,680	4	Medio
0,03295	0,0162	0,95082	54,626	174,857	8,797	4	Medio
0,03259	0,0168	0,95060	54,991	174,904	8,966	4	Medio
0,03256	0,0176	0,94984	55,624	175,214	8,996	4	Medio
0,03321	0,0182	0,94859	56,289	175,820	8,733	4	Medio
0,03292	0,0190	0,94804	56,859	176,012	8,872	4	Medio
0,03320	0,0194	0,94740	57,217	176,316	8,767	4	Medio
0,03307	0,0197	0,94722	57,416	176,373	8,826	4	Medio
0,03286	0,0208	0,94633	58,203	176,718	8,940	4	Medio
0,03286	0,0208	0,94633	58,203	176,718	8,940	4	Medio
0,03336	0,0212	0,94542	58,630	177,165	8,748	5	Medio
0,03303	0,0227	0,94429	59,622	177,590	8,918	4	Medio
0,03303	0,0227	0,94429	59,622	177,590	8,918	4	Medio
0,03290	0,0235	0,94359	60,202	177,867	8,990	4	Medio
0,03330	0,0240	0,94268	60,635	178,296	8,848	4	Medio
0,03335	0,0248	0,94190	61,162	178,628	8,852	4	Medio
0,03377	0,0252	0,94104	61,544	179,045	8,701	5	Medio
0,03340	0,0261	0,94048	62,120	179,230	8,870	5	Medio
0,03326	0,0273	0,93945	62,894	179,639	8,957	4	Medio
0,03326	0,0273	0,93945	62,894	179,639	8,957	4	Medio
0,03328	0,0278	0,93894	63,227	179,853	8,964	3	Bajo
0,03329	0,0287	0,93801	63,841	180,246	8,984	3	Bajo
0,03372	0,0293	0,93703	64,261	180,710	8,849	4	Medio
0,03363	0,0299	0,93649	64,658	180,924	8,900	4	Medio
0,03355	0,0305	0,93595	65,049	181,139	8,947	4	Medio
0,03369	0,0312	0,93512	65,509	181,500	8,922	4	Medio
0,03357	0,0320	0,93439	66,036	181,790	8,989	4	Medio
0,03374	0,0330	0,93331	66,627	182,263	8,961	4	Medio
0,03416	0,0337	0,93211	67,146	182,819	8,841	5	Medio
0,03389	0,0344	0,93173	67,522	182,942	8,955	4	Medio
0,03419	0,0352	0,93063	68,036	183,442	8,881	5	Medio
0,03419	0,0357	0,93014	68,333	183,645	8,898	5	Medio
0,03445	0,0364	0,92920	68,763	184,073	8,836	5	Medio
0,03420	0,0369	0,92895	69,045	184,144	8,937	6	Alto
0,03412	0,0378	0,92805	69,622	184,506	8,998	6	Alto
0,03468	0,0382	0,92712	69,874	184,968	8,830	6	Alto

0,03457	0,0390	0,92646	70,310	185,228	8,890	6	Alto
---------	--------	---------	--------	---------	-------	---	------

Fuente: Propia.

Existen tres situaciones que pueden presentarse a raíz de los datos arrojados por el AEMO:

1) que se requiera reducir los costos de los materiales, lo que produce que el valor del CBR sea bajo pero un impacto ambiental medio; 2) que busque un punto intermedio entre la capacidad portante del suelo y los costos, lo que implica un impacto bajo o 3) que se pretenda incrementar el CBR, lo que ascendería los costos y por consiguiente su impacto al medio ambiente sería alto.

En la tabla 34 muestra los resultados de los valores mínimos de cal y cemento necesarios para mejorar las propiedades mecánicas del cuesco y el impacto que genera su producción.

Tabla 34. Resultados de la evaluación multiobjetivo para material de afirmado con su impacto ambiental asociado.

ITEM	SITUACIÓN i	SITUACIÓN ii	SITUACIÓN iii
Fración Cal	0,03256	0,03328	0,03457
Fración Cemento	0,0010	0,0278	0,0390
Mezcla 20/80	0,96639	0,93894	0,92646
CBR (%)	38,960	63,227	70,310
Costo (\$/kg)	168,313	179,853	185,228
IP (%)	8,829	8,964	8,890
Impacto ambiental	Medio	Bajo	Alto

Fuente: Propia.

9. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos practicados a los apiques de suelo, el cuesco, la optimización del AEMO y la evaluación del impacto ambiental para alternativas de mezclas de residuos de la palma, se concluye que:

- Ninguno de los cuatro apiques de suelos muestreados en la presente investigación cumplió a cabalidad los requisitos mínimos de la norma INVÍAS para afirmado. Sus granulometrías no se ajustaron a los límites permisibles y su índice plástico estuvo por debajo del 1%. Es de anotar que por parte del ensayo de degaste en la máquina de los Ángeles y el CBR, se obtuvieron resultados favorables en sus resultados.
- La distribución del tamaño de grano del cuesco no cumple con las especificaciones mínimas de INVÍAS. Adicionalmente, es un material No plástico, al cual no se le puede realizar el ensayo de CBR. Pero si obtuvo valores aceptables para el ensayo de degaste e índice de alargamiento y aplanamiento. Lo que se determina que este residuo de palma por sí solo, no se puede considerar viable para el uso de afirmado.
- A partir de la implementación del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (AEMO), se logró la identificar la mezcla óptima que reduce el costo, el impacto ambiental y cumple con la norma INVÍAS para afirmado. La combinación es de 20/80, es decir, 20% de apiques de suelo y 80% cuesco, 3.256% de Cal y 0,10% de cemento. Esta distribución de porcentajes permite obtener un CBR de 38,96%, un IP de 8,829% y una media afectación al medio ambiente.
- Se recomienda que en un próximo trabajo de investigación se tome como referencia los porcentajes propuestos para la mezcla óptima y se validen los resultados obtenidos.

- Se propone triturar más cantidad de cuesco para incrementar el porcentaje de partículas finas y así lograr que el ajuste granulométrico para afirmado, encaje entre los límites especificados por INVÍAS.

10. BIBLOGRAFÍA

- Alengaram, U. J., Muhit, B. A. al, & Jumaat, M. Z. bin. (2013). Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 38, 161–172. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.026>
- Alfatah, T., Mistar, E. M., Syabriyana, M., & Supardan, M. D. (2022). Advances in oil palm shell fibre reinforced thermoplastic and thermoset polymer composites. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4945–4962. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2021.09.061>
- Anyaoaha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 399–409. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.04.022>
- Arceo, D., Quintana, J., Carrión, F., Crespo, S., Hernández, A., & López, J. (2013). *Diseño de Algoritmos Genéticos para la detección de daños en estructuras. Publicación Técnica*. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt386.pdf>
- Atencia, L. (2014). *Estudio de impacto ambiental en planta extractora aceites S.A.S.* Disponible en <https://www.aceitesa.com/documentos/reportes/Estudio%20de%20Impacto%20Ambiental%20Extractora%20Aceites%20SA.pdf>
- Bagriacik, B. (2021). Utilization of alkali-activated construction demolition waste for sandy soil improvement with large-scale laboratory experiments. *Construction and Building Materials*, 302, 124173. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124173>

- Bañon, I, Beviá, G., & José, Francisco. (2000). *Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto* (C. de O. S. A. Ortiz e Hijos, Ed.; Tomo 1). Disponible en <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/1788>
- Bastidas, M. (2010). *Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía* (Tesis doctoral, Universidad Nacional). Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70182/77033581.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Becerra, E. (2017). *Caracterización del desecho agroindustrial de la palma de aceite “cuesco” para el mejoramiento de las capas granulares de la estructura de pavimento* (Tesis de especialización, Universidad de Manizales) [UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA]. Archivo digital. Disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16516/BecerraBecerraErikaLorena2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Braja, M. das. (2015). *fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. https://issuu.com/gustavochoonlongalcivar/docs/fundamentos_de_ingenieria_de_ciment
- Buzón, J. (2009). Uso del Cuesco de la Palma Africana en la fabricación de Adoquines y Bloques de Mampostería. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. http://www.laccei.org/LACCEI2009-Venezuela/Papers/EII202_BuzonOjeda.pdf
- Cabrera, M., Rosales, J., Ayuso, J., Estaire, J., & Agrela, F. (2018). Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths. *Construction and Building Materials*, 181, 266–275. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.035>

- Castro, S., & Guío, O. (2004). *Estudio de impacto ambiental para la explotación de roca caliza a cielo abierto y producción de cal en la vereda Las Caleras en el municipio de Nobsa Boyacá* . Disponible en https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2531&context=ing_ambiental_sanitaria
- Chavez, H. (2017). *Identificación y evaluación de impactos ambientales de una Planta Productora de Cemento en Islay, Arequipa, 2017*. Disponible en <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6718/AMchvihr.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Coello, C. (1995). *Introducción a los algoritmos genéticos. Soluciones Avanzadas* (Tecnologías de Información, Ed.).
- Cotes, L. (2017). *Evaluación de la influencia de la adición de ceniza del cuesco de palma africana en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas fabricadas con material laterítico* (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia) [Universidad Nacional de Colombia]. Archivo digital. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79624/1082925312.2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Fanijo, E., Babafemi, A. J., & Arowojolu, O. (2020). Performance of laterized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 250, 118829. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118829>
- FEDEPALMA. (2020). *Balance económico del sector palmero colombiano en 2019*. Boletín Económico . <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/BET-IV-Trimestre-2019.pdf>

- García, B., & Díaz, L. (2019). *Proyecto de investigación evaluación de la resistencia a la compresión del concreto utilizando el cuesco proveniente de los residuos de fruto fresco de la palma africana y el concreto de residuos de construcción y demolición en obras civiles (RCD) (Tesis de pregrado, Universidad santo tomás)*. Archivo digital. Disponible en <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/21277>
- García, J. (2014). *Análisis e implementación de algoritmos evolutivos para la optimización de simulaciones en ingeniería civil (Tesis de maestría. Universidad Politecnica)*. Disponible en <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.5054.pdf>
- Garzón, E., Sánchez, P., Raigón, M., & Ruíz, A. (2006). Efectos de la compactación y estabilización con cemento y cal en las propiedades mecánicas de filitas. *MACLA*. Disponible en https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/83339/RSEM_raigon_2006_efctos.pdf?sequence=1
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., & Pazos, A. (2010). *Introducción a los Algoritmos genéticos y la Programación genética*. Universidad de Coruña. Disponible en <https://vbook.pub/documents/introduccion-a-los-algoritmos-geneticos-y-la-programacion-genetica-e2x34rydq320>
- Gungat, L., Putri, E. E., & Makinda, J. (2013). Effects of Oil Palm Shell and Curing Time to the Load-Bearing Capacity of Clay Subgrade. *Procedia Engineering*, 54, 690–697. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.03.063>

- Guzmán, M., & Delgado, A. (2005). Optimización de la geometría de un eje aplicando algoritmos genéticos. *Universidad Nacional*. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/28677>
- Hamada, H. M., Skariah Thomas, B., Tayeh, B., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Yang, J. (2020). Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 265, 120357. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120357>
- IECA. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Disponible en <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>
- Jerez, L., & Murillo, C. (2016). Determinación del potencial expansivo de un suelo natural y estabilizado del Vichada, empleando SWCC. *ISRM 2nd International Specialized Conference on Soft Rocks*. <https://onepetro.org/ISRMICSR/proceedings-abstract/ICSR16/All-ICSR16/ISRM-ICSR-2016-007/177198>
- Jiménez, Y. (2017). *Optimización de materiales de excavación de reutilización industrial (MERI) de la mina de carbón “cerrolargo” para la estabilización de suelos en el desarrollo de infraestructura vial mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo (AEMO)*. (Tesis de maestría. Universidad Santo Tomás). Disponible en <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9167/JimenezYolanda2017.pdf?sequence=1>
- Jiménez, Y., Bastidas, M., & Consuegra, J. (2019). Obtaining of coal mining waste mixtures for the soil stabilization through multiobjective evolutive algorithm. *Informacion Tecnologica*, 30(4), 249–258. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400249>

- Kahar, P., Rachmadona, N., Pangestu, R., Palar, R., Triyono Nugroho Adi, D., Betha Juanssilfero, A., Yopi, Manurung, I., Hama, S., & Ogino, C. (2022). An integrated biorefinery strategy for the utilization of palm-oil wastes. *Bioresource Technology*, *344*, 126266. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126266>
- Khankhaje, E., Rafieizonooz, M., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, & Hussin, M. W. (2017). Comparing the effects of oil palm kernel shell and cockle shell on properties of pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *10*(5), 383–392. <https://doi.org/10.1016/J.IJPRT.2017.05.003>
- Loi, S., Raghunandan, M., Susilawati, & Thong, T. (2019). Influence of Oil Palm Shell (OPS) on the Compaction Behavior and Strength Improvement of Soil-OPS Composites: A Pilot Study. *Sustainable Civil Infrastructures*. https://link-springer-com.proxy.bidig.areandina.edu.co/chapter/10.1007/978-3-030-01911-2_11#citeas
- Lozano, R., Alegre, J., Velazco, E., Mendoza, M., & Nieto, W. (2021). Biocarbón de cáscaras de semilla de palma aceitera enriquecido en biol de estiércol para mejorar suelos sobre pastoreados. *Tayacaja*. https://www.researchgate.net/publication/352341429_Biocarbon_de_cascaras_de_semilla_de_palma_aceitera_enriquecido_en_biol_de_estiercol_para_mejorar_suelos_sobre_pastoreados
- Mannan, M. A., & Ganapathy, C. (2002). Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, *16*(1), 29–34. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00030-7)

- Ministerio de Transporte. (2021). *Radiografía de las obras terciarias*. La República .
<https://www.larepublica.co/infraestructura/santos-alista-126-billones-para-red-vial-terciaria-2472831>
- Molina, C. (2012). *Análisis de competición entre dos mercados accionarios utilizando el modelo de comportamiento Lotka-Volterra resuelto con algoritmos genéticos*. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bmfciz.25a/doc/bmfciz.25a.pdf>
- Orobio, A., Portocarrero, L., & Serna, L. (2007). Evaluación del cloruro de calcio como agente mitigador de polvo en vías en afirmado. *Dina*. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532007000300003
- Quintero, L. (2004). *Un algoritmo basado en evolución diferencial para resolver problemas multiobjetivo (Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional)*. Disponible en <https://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2004/tesisLuisVSantana.pdf>
- Quintero, L. (2017). *Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar (Tesis de maestría, Universidad de Manizales)*. Archivo digital. Disponible en <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3286/Evaluaci%C3%B3n%20de%20potencial%20energ%C3%A9tico%20de%20los%20residuos%20s%C3%B3lidos%20agroindustriales%20del%20proceso%20de%20extracci%C3%B3n%20de%20aceite%20de%20palma%20africana%20como%20alternativa%20energ%C3%A9tica%20para%20el%20reemplazo%20de%20la%20le%C3%B1a%20en%20la%20zona%20norte%20del%20departamento%20del%20Cesar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ramirez, S. (2014). *Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo para el Diseño Óptimo de Armaduras de Acero (Tesis de maestría. Pontificia Universidad Javeriana)*. Disponible en <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12670/RamirezEcheverriSebastian2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Ramírez, S. (2014). *Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo para el Diseño Óptimo de Armaduras de Acero (Tesis de maestría. Pontificia Universidad Javeriana)*. Disponible en <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12670/RamirezEcheverriSebastian2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Rudolf, K., Hennings, N., Dippold, M. A., Edison, E., & Wollni, M. (2021). Improving economic and environmental outcomes in oil palm smallholdings: The relationship between mulching, soil properties and yields. *Agricultural Systems*, 193, 103242. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2021.103242>
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el servicio geológico colombiano - plancha 41, becerril*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010028468/Documento/Pdf/2105284681101000.pdf>
- Truckell, I. G., Shah, S. H., Baillie, I. C., Hallett, S. H., & Sakrabani, R. (2019). Soil and transport factors in potential distribution systems for biofertilisers derived from palm oil

mill residues in Malaysia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105005.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.105005>

Yaro, N. S. A., bin Napiah, M., Sutanto, M. H., Usman, A., & Saeed, S. M. (2021). Performance evaluation of waste palm oil fiber reinforced stone matrix asphalt mixtures using traditional and sequential mixing processes. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00783.

<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00783>