

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS DE TERRAPLENES CON CENIZAS DE BAGAZO
DE CAÑA DE AZÚCAR
STABILIZATION OF EMBANKMENT SOILS WITH SUGAR CANE BAGASSE ASH

Ing. Daríel Soto Portillo¹, (0000-0001-9767-9373), Universidad de Matanzas,

dariel.soto@umcc.cu

Est. Ernesto Rafael Sánchez Ramírez²

Dr. C. Ing. Manuel Pedroso Martínez³ (0000-0001-9767-9379)

Ing. Luis David Céspedes Domínguez⁴ (0000-0001-8291-6589)

Ing. Ernesto Romero Carmenate⁵ (0000-0002-8891-3757)

Resumen

La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) puede ser utilizada como un aditivo para la estabilización de suelos en proyectos de infraestructura vial, para tener una construcción sostenible, reduciendo de esta manera los impactos ambientales. El presente trabajo consiste en la estabilización de un suelo arcilloso – limoso presente en una zona agroindustrial, mediante la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar, en diferentes porcentajes (5 %, 10 % y 15 % con respecto al suelo seco). Durante el proceso experimental se desarrollan teóricamente, los ensayos de caracterización al suelo; y el porcentaje de CBR tanto de la muestra inalterada como de la muestra con adición de CBCA. La investigación aborda los antecedentes de la utilización de la CBCA en la industria de la construcción, además aporta datos sobre la producción de la caña de azúcar y sus derivados en Cuba.

Palabras claves: CBR; ceniza de bagazo de caña; estabilización; residuos



Monografías 2021

Universidad de Matanzas © 2021

ISBN: 978 - 959 - 16 - 4681 - 1

ABSTRACT

The ash of waste pulp of sugar cane (CBCA) can be used as additive for the stabilization of earthes in projects of linked to roads, streets and high-ways substructure, to have a sustainable construction, by reducing of this way, the environmental impacts. The present work consists in the stabilization of a loamy-oozy earth, it present in an agroindustrial area, by means of the addition of ash of waste pulp of sugar cane, in different percentages (5 %, 10 % y 15 % with respect to the dry earth). During the experimental process, develop theoretically the trials of characterization to the earth, and the percentage of CBR so much of the unaffected sample as of the sample with addition of CBCA. The investigation approaches the antecedents of the use of the CBCA in the industry of the construction, moreover contributes datas on the production of the sugar cane and your by-products in Cuba.

Keywords: *ash of waste pulp of sugar cane; CBR; stabilization; remainders.*

En obras de infraestructura vial, los suelos encontrados en la zona de proyecto son los materiales principalmente empleados para la construcción de terraplenes, por lo tanto, su desempeño es de vital importancia para una adecuada vida de servicio en cualquier estructura en función. Estos suelos al ser empleados en obras de ingeniería deben cumplir requisitos de calidad establecidos en normativas internacionales, y de no cumplir dichos requerimientos se debe recurrir a métodos de mejoramiento, principalmente en sus características de estabilidad volumétrica y resistencia.

El mejoramiento de un suelo está fuertemente relacionado con el proceso de compactación y la adición de agentes estabilizadores e influyen directamente en el control de calidad de las capas conformadas, buscando obtener estructuras de suelo resistentes, económicas y con aportes a la sustentabilidad.

De lo anterior la adición de agentes que actúan mediante principios físico-químicos ha sido una de las técnicas mayormente empleadas en el tratamiento de suelos, sustancias como la cal, cemento portland, asfalto, ceniza volante, escoria de alto horno, ceniza de cascarilla de arroz entre otras, han sido objeto de investigación y análisis sobre su influencia en suelos de diversas clasificaciones observándose incrementos en resistencia y durabilidad debido a los procesos físico-químicos que ocurren en las mezclas y que además en el caso de las puzolanas se han empleado con el objetivo

de reducir el consumo de cemento portland, cal y asfalto debido a la alta demanda energética y generación de CO₂ durante su procesamiento.

Actualmente la ceniza de bagazo de la caña de azúcar (CBCA) es uno de los materiales suplementarios con mayor número de investigaciones como material suplementario al cemento portland en mezclas de concretos y morteros (Morales et al., 2015), siendo una alternativa reciente en el mejoramiento de los suelos en sus características físicas como el confinamiento, densificación y estabilidad volumétrica, y químicas a través de las reacciones del agente estabilizador (cemento o cal) con el agua y en casos excepcionales con los constituyentes del suelo (arcillas principalmente), donde su empleo como material de construcción contribuiría a resolver la problemática de generación y disposición de residuos agroindustriales, que tan solo en Cuba sus 56 ingenios azucareros generan toneladas de bagazo con cada zafra, que una vez calcinado se convierte en ceniza cuya disposición final no está determinada. En diversos estudios se ha reportado que la combustión del bagazo de caña en las calderas de los ingenios genera un subproducto denominado ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), con elevados contenidos de sílice y alúmina como óxidos principales, que en condiciones adecuadas reacciona con el hidróxido de calcio, generándose una actividad puzolánica (Cordeiro & Toledo, 2017). Esta actividad puzolánica está en función del tamaño de las partículas, contenido de material amorfo (aluminosilicatos), hidróxido de calcio presente y contenido adecuado de humedad, haciendo mención algunos investigadores, que la ceniza no consumida durante la reacción puede servir como material de relleno, ocupando los espacios vacíos presentes en el material compuesto y donde en un suelo dinámicamente compactado ofrecería una alternativa para incrementar su estabilidad por efecto del sellado de poros en el suelo compactado y una posible reacción puzolánica a edades tardías.

El presente trabajo tiene como objetivo: Analizar, de forma teórica, el empleo de la CBCA como estabilizador de suelos en terraplenes rurales.

Las cenizas de biomasa son materiales livianos producidos con materias primas de origen vegetal, renovables y disponibles localmente. Se pueden considerar recursos inagotables, ya sea en su forma original o cuando son obtenidos de residuos originarios de procesos industriales.

El estudio de biomasa como material cementante ha alcanzado en los últimos años un gran auge. La generación de residuos, tales como la ceniza de caña de azúcar, se ha convertido en un problema

ambiental, motivando un especial interés de estudiar su aprovechamiento en la ingeniería civil, minimizando el impacto que genera su producción.

Por ejemplo, Tórrez et al. (2014) evalúa la ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera nicaragüense como material alternativo al cemento Portland. En ese estudio se determinó que las cenizas de bagazo de caña de azúcar son un material puzolánico con una mejor reactividad frente al Ca(OH)_2 con 15 % de sustitución.

Chávez (2017) evalúa los efectos de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico, concluyendo que influye positivamente, dado que aumenta en un 21.88 % la resistencia a la compresión para una adición del 3.24 % respecto del volumen absoluto de agregado fino.

Por otro lado, se sabe que las cenizas pueden tener propiedades puzolánicas al ser calcinadas a ciertas temperaturas (400°C a 800°C). Dependerá de la composición química original del residuo, de las condiciones de calcinación y el uso de flujo de aire forzado (Soares et al., 2014).

Vidal et al. (2014) estudiaron tres cenizas procedentes de ingenios azucareros del Valle del Cauca, por medio de composición química, difracción de rayos X y actividad puzolánica.

Las cenizas estudiadas contenían sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) amorfas, lo cual favorecía la reactividad con el cemento. Las muestras fueron tratadas térmicamente debido al alto contenido de partículas carbonosas producto de la combustión incompleta y se les determinó la actividad puzolánica, encontrándose índices hasta del 97 %. Se concluyó que las cenizas pueden ser adicionadas al cemento para la elaboración de materiales de construcción.

Chusilp et al. (2009) estudiaron el uso de la ceniza de bagazo como un material puzolánico apto para ser utilizado en el concreto. La adición de ceniza mejora la resistencia, la permeabilidad y la evolución del calor. Se obtuvo que el porcentaje óptimo de sustitución de ceniza es de 20 %.

Muchos investigadores han intentado estabilizar suelos químicamente usando materiales cementantes y residuos agrícolas, quienes compararon la estabilización de suelos arcillosos utilizando diversos desechos agrícolas como cenizas volantes (FA), cenizas de cáscara de arroz (RHA), cenizas de bagazo (BA) y cenizas de paja de arroz (RSA) sin ningún otro tipo de aglomerante para mejorar la capacidad de carga del suelo. Las propiedades que se probaron fueron el límite de contracción, las características de compactación y el CBR. Se observaron mejoras marcadas en los

límites de contracción para el suelo mezclado con FA, BA, RHA y RSA, esta fue más pronunciada para un 30 % de mezcla de RHA. Además, llegaron a la conclusión de que los cuatro desechos industriales provocaban un aumento en el contenido óptimo de humedad y una disminución de la densidad seca máxima del suelo estabilizado. Independientemente del período de curado, todas las cenizas produjeron un incremento del CBR, aunque este incremento depende del tipo de ceniza. Las cantidades necesarias de cenizas para lograr este resultado depende de la misma: Las cenizas volantes, de cáscara de arroz y las de bagazo de caña se deben añadir hasta un 25 % y la ceniza de paja de arroz, hasta un 20 %. La ceniza de paja de arroz produjo un mejor valor de CBR en comparación con los otros tres materiales de desechos industriales.

Gandhi (2012) trabajó en la mejora de los suelos expansivos de baja resistencia utilizando cenizas de bagazo de caña de azúcar. En este caso, la ceniza fue usada como un fino no cohesivo no plástico que modificaba tanto su granulometría como los límites de Atterberg. Se verificó que la ceniza absorbía la humedad de los suelos de manera efectiva y les proporcionaba una ganancia de resistencia inicial. Además, se comprobó que mientras el porcentaje de ceniza aumenta, el límite líquido, la plasticidad, el hinchamiento y la contracción disminuyen.

Onyelowe (2012) estudió la estabilización de un suelo laterítico (residual, limo arcilloso, plástico) utilizando cemento entre un 4 % y un 6 % junto con cenizas de bagazo de caña hasta un 10 % en peso de suelo seco. Aquí la ceniza actuó como puzolana, observándose un aumento del contenido óptimo de humedad y del CBR a medida que se aumentaba el contenido de ceniza.

Por otro lado, Kiran y Kiran (2013) observaron que la mezcla de cenizas de bagazo de la caña de azúcar para un suelo expansivo no originó un aumento significativo en la densidad, pero los valores de CBR y resistencia a la compresión no confinada (UCS) se incrementaron con la adición de un 8 % de cenizas de bagazo. Además, comprobaron que los valores de densidad aumentaron de 15.16 KN/m³ a 16.5 KN/m³ para la adición de 8 % de ceniza de bagazo con 8 % de cemento, luego los valores de CBR aumentaron de 2.12 a 5.43 para la adición de 4 % de ceniza de bagazo con 8 % de cemento y valores de UCS se incrementó de 84.92 KN/m² a 174.91 KN/m² para la adición de 8 % de ceniza de bagazo con 8 % de cemento.

Por último, concluyeron que, los resultados de la mezcla de ceniza de bagazo con diferente porcentaje de cal para un suelo expansivo dieron un cambio considerable en los valores de CBR y UCS, pero los valores de densidad disminuyeron con la mayor cantidad de contenido de cal.

Kharade et al. (2014) trabajó con cenizas de bagazo utilizada para estabilizar suelos expansivos en proporciones del 3 %, 6 %, 9 % y 12 % en peso del suelo. En esa investigación se verificó que la ceniza se comportaba como un fino no cohesivo que modifica las propiedades del suelo, aumentando su máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad hasta un reemplazo del 6 % con ceniza de bagazo y disminuyendo dichas propiedades cuando el reemplazo de bagazo de ceniza es mayor del 6 %, esto se lo atribuyen a que la ceniza de bagazo de baja gravedad específica reemplaza el suelo de gravedad específica más alta y es de naturaleza fibrosa. Los resultados de CBR aumentan casi un 40 % hasta con un reemplazo de 6 % de bagazo de ceniza y empiezan a disminuir cuando el porcentaje de ceniza aumenta esto se debe a que el óptimo contenido de humedad es responsable de los valores del CBR. A bajos niveles de energía se dispone de menos agua para controlar el proceso de hidratación, lo que conduce a formar enlaces de resistencia y da como resultado menos resistencia. Los resultados de UCS varían de la misma manera y esto se le puede atribuir al efecto del tamaño del grano del suelo y a la gravedad específica de ambos materiales.

En las investigaciones citadas se ha usado con éxito la ceniza de la caña de azúcar en suelos plásticos, evidenciándose una gran efectividad para disminuir su susceptibilidad al agua, aumentar la capacidad de soporte y controlar las deformaciones. Aunque los investigadores no evalúan la actividad puzolánica de la ceniza, en algunos casos se ha verificado su efecto cuando ha estado acompañada de otro cementante estabilizador como la cal hidráulica o el cemento.

En Cuba, en los últimos años se han desarrollado innumerables estudios sobre estabilización de suelos con diferentes adiciones, entre ellas cal, cemento, cenizas de cascara de arroz y de bagazo de caña, entre otros. En las recientes búsquedas que realizara el autor, no fue posible encontrar una publicación seria y respaldada por información científica concluyente a pesar de ser una temática recurrente en la red de universidades del país.

La ceniza del bagazo de caña de azúcar es un subproducto de los desechos de la fabricación del azúcar. Se utiliza como combustible que sirve para calentar las calderas para obtener el azúcar. Su

propiedad como cementante permite ser usado como un material puzolánico, que mejora las propiedades de los productos con los que se reemplaza o combina. Además, hay que conocer que la fibra de la caña de azúcar representa entre un 40 – 50 % de su volumen de toda la planta.

La caña es un cultivo de zonas tropicales o subtropicales del mundo. Requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que asimila muy bien la radiación solar, teniendo una eficiencia cercana a 2 % de conversión de la energía incidente en biomasa. Un cultivo eficiente puede producir 100 a 150 toneladas de caña por hectárea por año (con 14 % a 17 % de sacarosa, 14 % a 16 % de fibra y 2 % de otros productos solubles).

Una vez cortada, la caña debe transportarse rápidamente al ingenio para evitar su deterioro por levaduras y microbios. El transporte se hace en vagones por vía férrea, o tirados por un camión o tractor.

La producción mundial de caña de azúcar en 2005 fue de 1,267 millones de toneladas, siendo el principal productor Brasil con 34 % de la producción mundial, India 18 %, China 7 %, Pakistán 4 %, México 4 %, Tailandia 3 %, Colombia 3 %, otros países representan el 27 % ; para la India, Pakistán y Cuba, representa la base fundamental de su economía.

El bagazo de la caña se genera de la molienda de la caña y extracción del jugo, que posteriormente es trasladado a la zona del horno para el quemado para además producir energía eléctrica y combustible. Al finalizar este proceso se obtiene la ceniza del bagazo de la caña, la cual puede aprovecharse para fines en la construcción (Ma-Tay, 2014).

El proceso de producción de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (C B C A) se muestra en la figura N° 1.

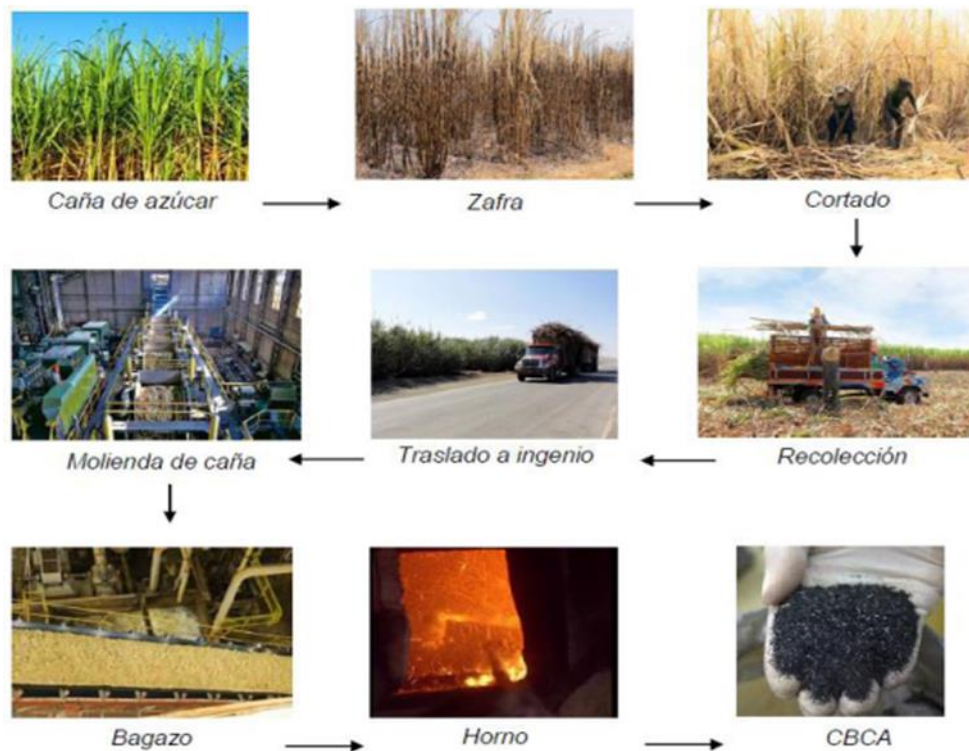


Figura 1: Proceso de producción de ceniza de bagazo de caña de azúcar

Fuente: May-Tay, 2014.

Por su composición química la CBCA tiene altos contenidos de materiales puzolánicos como el dióxido de silicio (SiO_2) y otros óxidos que producen la actividad puzolánica, lo que permiten trabajarlos como material cementante para estabilización de suelos o en morteros.

Las puzolanas son materiales sin capacidad de actividad hidráulica por sí solos, por esto se deben de mezclar con activadores alcalinos para generar compuestos con propiedades aglomerantes, dando a lugar a cementantes hidráulicos como es la cal (Salazar, 2011).

Los estudios indican que el cemento o cal y la CBCA, pueden modificar las propiedades mecánicas y puede mejorar otras como la penetración de la humedad hacia los concretos, además en el caso de suelos susceptibles a fallas estos mismos activados con materiales químicos forman geopolímeros que le añadan resistencia al suelo.

El grupo empresarial AZCUBA es el encargado de todo el proceso relacionado con la producción de azúcar y sus derivados, que está actualmente constituido por más de 114 instalaciones distribuidas

en todo el país, proyectándose su necesario futuro crecimiento dentro de los planes de desarrollo del sector.

El Ministerio de la Construcción también resulta imprescindible en el empleo que se pretende dar, con esta investigación, al residuo de la CBCA en terraplenes rurales de la nación.

La agroindustria azucarera cubana, debido a las transformaciones que se han estado efectuando en la misma desde el año 2002 y que comenzaron con la desactivación de 95 fábricas de azúcar, cuenta actualmente con 56 ingenios, de ellos, 46 estuvieron operando durante la zafra 2011-2012. La producción de derivados de la caña de azúcar también se incluye dentro de las transformaciones y proyecciones de desarrollo planificadas para el sector, por su decisivo aporte a soluciones necesarias en las esferas de la alimentación animal, la producción de alcoholes y de bioproductos.

El bagazo de la caña de azúcar también se ha empleado tradicionalmente en Cuba como materia prima para la producción de pulpa para papel, esta producción pertenece a la Empresa del Papel. De las pulpas a partir de bagazo se pueden obtener productos de excelente calidad, en especial medio para corrugar y papeles blancos de imprenta y escribir.

En el país, a mediados de la década de los años 80 del pasado siglo, la capacidad instalada era de 105 000 t, y de 213 000 m³, para pulpa papelera y paneles, respectivamente, lo cual representaba una demanda potencial anual de 736 000 toneladas de bagazo base 50 % de humedad.

En la tabla 1 aparecen las fábricas de derivados actualmente activas, que pertenecen al Grupo Empresarial AZCUBA, con sus respectivas capacidades de producción.

Tabla 1: AZCUBA: plantas de producción de derivados

Producto	Cantidad	U.M.	Capacidad diaria	Capacidad anual
Alcohol	12	hL	6 030	1 628 100
CO ₂	5	t	20	5 400
<i>L. Saccharomyces</i>	11	t	154	41 699
<i>L. Torula</i>	4	t	84	22 680
Miel urea bagacillo	34	t	180	21 600
Miel amonificada	1	t	20	5 400
Tableros	2	m ³	60	16 200
Ron (MN)	15	hL	500	135 000
Ron (MLC)	13	hL	500	135 000
Licor (MLC)	2	hL	40	10 800
Glucosa azucarera	2	t	5	1 350
Sirope de fructosa crudo	2	t	30	8 100
Caramelo (MN)	1	t	6	1 800
Caramelo (MLC)	1	t	2,5	750
Sorbitol	1	t	33	9 900
Fitomas*	1	miles de L	7,3	2 200
Alimento ensilado	1	t	45	16 200
Bloques multinutricionales**	1	t	18,57	5 571
Bagazo hidrolizado	1	t	35	6 090

El bagazo de la caña de azúcar también se ha empleado tradicionalmente en Cuba como materia prima para la producción de pulpa para papel, y aunque esta producción no está ubicada dentro del sector agroindustrial azucarero, los especialistas de esta rama han estado relacionados estrechamente con la Empresa del Papel, que dirige y controla esta actividad en el país.

La producción de pulpa y papel durante el período 2005 - 2010, en la que se incluye la de pulpa a partir de bagazo, fue la que se presenta en la tabla 2, según reporta la Oficina Nacional de Estadísticas

Tabla 2: Empresa del papel: producción de pulpa y papel (2005 - 2010)

PRODUCCIÓN	UM	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pulpa para papel de bagazo	Mt	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1
Papel total	Mt	8,3	9,5	9,1	8,4	7,7	8,4

Como se puede apreciar, el bagazo de la caña es utilizado en varias maneras en la industria, incluyendo la de la construcción con la elaboración de paneles divisorios y falsos techos principalmente, pero la CBCA, la cual es un residuo de la quema del bagazo de la caña como combustible en los centrales azucareros, no cuenta con un aprovechamiento óptimo en el país, la cual en la mayoría de las ocasiones es desechada.

Por dicha razón se intensifican los estudios para aprovechar este residuo industrial abundante en todas las regiones del país que cuentan con centrales azucareros.

La ceniza de bagazo contiene una gran cantidad de sílice, que es el componente más importante de materiales de reemplazo de cemento. También se encuentra en gran cantidad como un subproducto en las fábricas de azúcar. A pesar de esta abundancia y contenido de sílice, se ha hecho relativamente poco para examinar la potencial de este material para la estabilización del suelo. Aunque poco, las investigaciones realizadas conformar la idoneidad de este material para la estabilización del suelo como una mezcla con cal y cemento. Pero aun así su idoneidad como material independiente sigue siendo cuestionable.

La sustitución parcial de suelo por CBCA tiene influencia en las propiedades de compactación (Proctor Modificado), resistencia a la compresión simple no confinada y CBR de un suelo granular arcilloso - limoso, empleándose con el fin de mejorar sus características mecánicas y ser empleado como subrasante de un pavimento, aprovechando un material de desecho agroindustrial, que a pesar de ser porcentajes pequeños de adición, terminan generando un impacto económico y ambiental por la creciente construcción de kilómetros de carreteras a lo largo del mundo.

Para la adecuada caracterización de este residuo como estabilizador de suelo, se deben realizar experimentos asociados a la extracción de suelo y a la mezcla de este con adiciones de CBCA:

Ensayos de laboratorio al suelo natural

- Granulometría
- Contenido de humedad
- Límite líquido y plástico
- Gravedad específica

Ensayos de laboratorio al suelo con adiciones de CBCA

- Ensayo Proctor Modificado
- Ensayo de Compresión simple no confinada.
- Ensayo CBR

El presente trabajo es una investigación experimental pura ya que los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto (variable dependiente) de una causa (variable independiente) que se manipula.

La siguiente figura muestra el Diseño Experimental:

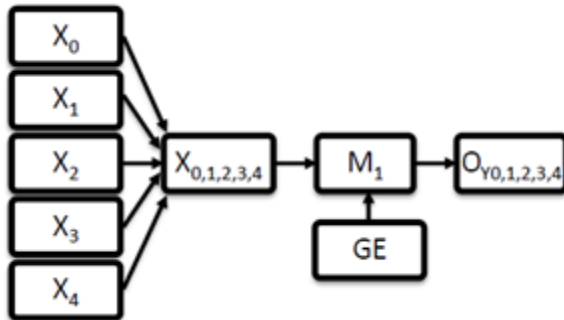


Figura 2: Esquema del diseño experimental

Donde:

Grupo Experimental: GE

Variable Independiente (x): % de adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA)

Variable Dependiente (y): Estabilización de Suelos para Subrasantes.

Muestra no Alterada: M

Medición de la Muestra: OY

Unidad de estudio: Suelos de lugares rurales con desarrollo agroindustrial.

Población: Toda la población contemplada en la presente investigación es de 100 kilogramos de suelo extraído de los puntos de investigación. La muestra de suelo extraída será estabilizada mediante la adición de diferentes porcentajes de un agente estabilizador como es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), para su posterior caracterización y evaluación de desempeño a nivel de subrasante mediante ensayos de laboratorio.

Muestra (muestreo o selección): Muestra no probabilística e intencional, Porque se escoge sus unidades no en forma fortuita, sino en forma arbitraria, designando a cada unidad según características que al investigador resulten de relevancia.

Técnicas, procedimientos e instrumentos:

La técnica de recolección de datos de la presente investigación será por medio de la observación directa, la cual permite la visualización y registro de las calicatas realizadas como unidades de

control, en formatos diseñados para cada tipo de estudio, conservándose el orden, la precisión y coherencia de los datos obtenidos.

Este proceso de conocimiento permite percibir deliberadamente el tipo de suelo que existe en el desarrollado de esta investigación.

Procedimiento de Recolección de Datos: (Observación-guía de observación-muestreo)

Mediante la observación se hará la recolección de datos en campo, al seleccionar las características del suelo a analizar en la presente investigación, las cuales serán registradas en la guía de observación. Terminada dicha actividad se pasará al muestreo de suelo de los puntos de investigación anteriormente especificados, lo cual permitirá extraer una porción de suelo representativo de la zona para su posterior estudio de acuerdo a lo indicado en este trabajo.

Aborde Metodológico:

El método inductivo o inferencia estadística es el método de investigación que más se adapta al presente estudio debido que, a partir de la observación de datos y los registros propios de los ensayos experimentales, se contrastará las hipótesis planteadas como verdaderas o falsas. En el desarrollo de toda la investigación se pueden distinguir los pasos que están dentro del método inductivo.

Instrumentos para Procedimientos de Análisis de Datos:

Mediante la experimentación se busca la manipulación de la variable independiente, y de esta manera la observación de los resultados y su comparación con otros, en los cuales no haya operado la actuación deliberada del experimentador.

Es por tal, que los datos a obtener de cada uno de los ensayos a realizar en los Laboratorios de Mecánica de Suelos serán registrados en los formatos de elaboración propia diseñados para cada ensayo considerado en el presente trabajo de investigación, siendo estos:

Tabla 3: Instrumentos para el procedimiento de análisis de datos.

Fuente: elaboración propia

TIPO DE ENSAYO	INSTRUMENTOS	DESCRIPCIÓN
CARACTERISRICAS FISICAS	LIMITES DE CONSISTENCIA	Para caracterizar el comportamiento del suelo.
	GRANULOMETRÍA	Clasificación de los suelos.
	PESO ESPECIFICO	Peso específico de partículas.
	CONTENIDO DE HUMEDAD	Para caracterizar el comportamiento del suelo.
CARACTERISTICAS MECANICAS	PROCTOR MODIFICADO	Para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario de los suelos.
	RELACIÓN SOPORTE (CBR)	Para determinar la capacidad de carga de los suelos.

Análisis de Datos:

El análisis estadístico es de importancia en la evaluación de los resultados obtenidos porque nos permite tener certeza de la confiabilidad de los valores extraídos de las pruebas y en función a los parámetros estadísticos poder evaluar los resultados.

Distribución Normal Estándar:

• ENSAYO: California Bearing Ratio (CBR)

Se utilizará la expresión de intervalo de confianza de dos lados para una Distribución Normal:

$$[X_{med}-\mu] = K_{\alpha/2} \times [\sigma/\sqrt{n} \cdot 0.5] = \text{Máximo error permitido}$$

Dónde:

• $K_{\alpha/2}$: Es el número de veces que se debe contemplar la desviación estándar para lograr un determinado grado de confiabilidad.

• σ : Desviación estándar encontrada para el CBR en suelos similares en otros proyectos.

Es sugerencia usar un nivel de confianza de 95 % y un máximo error permitido en términos de % en CBR igual a 2 %.

Para el nivel de confianza de 95 %:

$$\alpha/2 = (1-0.95)/2 = 0.05$$

$$K_{\alpha/2} = 1.645$$

Luego se tiene:

$$K\alpha/2 \times [\sigma/n 0.5]=2 \%$$

Reemplazando los datos, se obtiene:

$$K\alpha/2 \times [\sigma/n 0.5]=1.645 \times [2.10/n 0.5]$$

$n=2.983$ muestras

Aproximadamente 3 ensayos serán necesarios para satisfacer los requerimientos de la presente investigación, esto por cada una de las dosificaciones con las que se está trabajando.

Operacionalización de Variables:

La investigación experimental consiste en la manipulación intencional de una o más variables independientes no comprobadas, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento en particular con una o más variables dependientes. El presente trabajo es una investigación experimental explicativa, en el cual se consideran una variable independiente y una variable dependiente para el desarrollo de la investigación realizada.

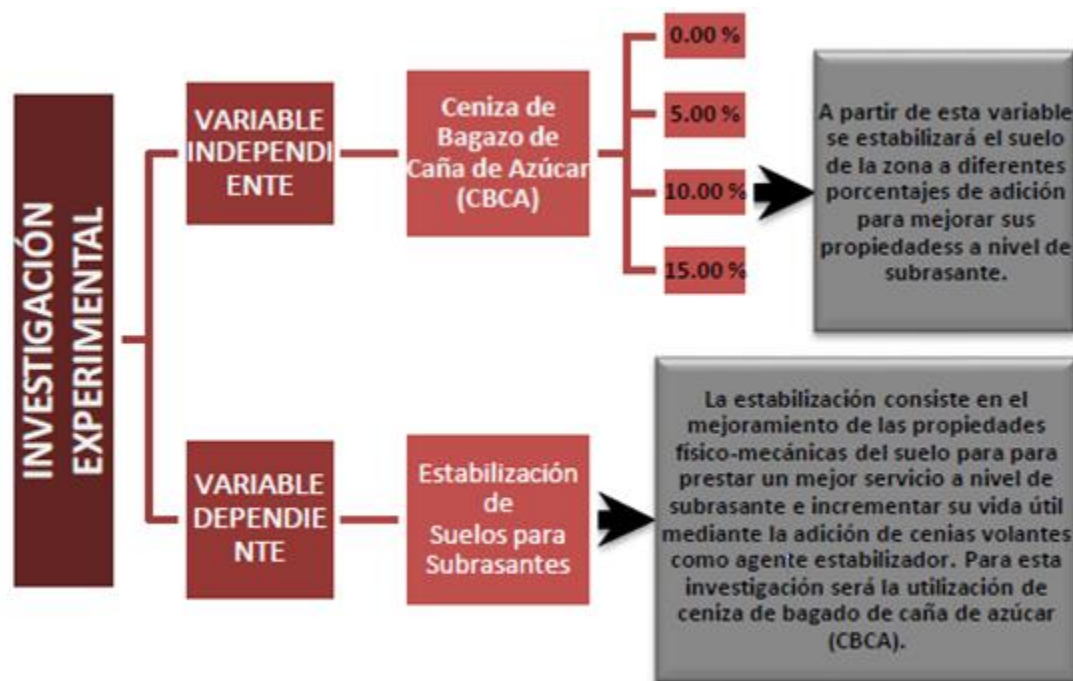


Figura 3: Operacionalización de las variables

Fuente: elaboración propia

Se puede concluir afirmando que, se logró analizar teóricamente, la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la estabilización de suelos a nivel de subrasante, verificándose, a partir del estudio de diversos autores, el aumento de resistencia progresivo del suelo a diferentes porcentajes, siendo 15 % el porcentaje óptimo de adición con el cual se alcanza una mejora del CBR en hasta un 60 %. En el transcurso de la investigación, fueron analizados diferentes aspectos como el proceso en que se genera la CBCA, los ensayos necesarios para su correcta caracterización, la elaboración de un diseño de experimento teórico mediante el cual se corroboren los resultados obtenidos por otros investigadores; pero bajo las condiciones y parámetros cubanos. En base al estudio realizado, se verificó que la estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar es una alternativa potencial de reutilización de residuos agroindustriales en la construcción de infraestructura vial, en aras de garantizar construcciones sostenibles, reduciendo de esta manera los impactos ambientales.

Referencias bibliográficas

- Aquino Mendoza, M. (2020). Estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar para su uso en subrasantes en el distrito de Laredo-Trujillo, La Libertad. (*Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*). Universidad Privada de Trujillo, Trujillo, Perú.
- ASTM International. (2016). ASTM D 1883-16 Standard test method for california bearing ratio (cbr) of laboratory-compacted soils. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1883-16>.
- ASTM International. (2017). ASTM C 150/C 150M-17 Standard specification for portland cement. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17.
- ASTM International. (2017). ASTM C 618-17a Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0618-17A>.
- ASTM International. (2017). ASTM D 1633-17 Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1633-17>.
- ASTM International. (2017). ASTM D 4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D4318-17>.

- Chávez, C. (2017). Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico. *Tesis de título. Universidad Nacional de Cajamarca*. Cajamarca.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, Ch. y Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*. 23, 3352-3358.
- Cordeiro, G. C. y Kurtis, K. E. (2017). Efecto del procesado mecánico sobre la catezoicidad de las cenizas de bagazo de caña de azúcar. *Investigación de cemento y hormigón*, Volumen 97, pp: 41-49.
- Delgado López, C.A. y Mendoza Meléndez, I.A. (2018). Influencia del porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar activada alcalinamente sobre la tensión efectiva en suelos susceptibles a licuación. *Tesis de título. Universidad Nacional de Trujillo*. Trujillo.
- Gandhi, K.S. (2012). Expansive soil Stabilization Using Bagasse Ash. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1 (5). 1-3.
- Kharade Amit, S., Suryavanshi Vishal, V., Gujar Bhikaji, S. y Deshmukh Rohankit, R. (2014). Waste product 'bagasse ash' from sugar industry can be used as stabilizing material for expansive soils. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 03(03). 506-512.
- Kiran, R.G. y Kiran, L. (2013). Analysis of Strength Characteristics of Black Cotton Soil Using Bagasse Ash and Additives as Stabilizer. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 02 (07). 2240-2246.
- Ma-Tay, D. (2014). Valoración de cenizas de bagazo procedentes de Honduras: Posibilidades de uso en matrices de Cemento Pórtland. Valencia.
- Morales, D. (2015). Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas. (*Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*). Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
- Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., Wu, W. (2016), "Optimum Utilization of Rice Husk Ash for Stabilization of Sub-base Materials in Construction and Repair Projects of Forest Roads".
- Norabuena, F. (2017). Resistencia de un suelo arcilloso sustituido al 6 % por ceniza de bagazo de caña de azúcar en Huanroc – Macate. (*Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*). Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.

- Ojeda F., Mendoza R. & Baltazar Z. (2018). Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante. *Alconpat*. PP. 194 – 208.
- Onyelowe, K. C. (2012). Uso de cemento para estabilización del suelo laterítico de Akwete y el uso de cenizas de bagazo como aditivo. *Investigaciones de ciencia e ingeniería*. PP. 16-20.
- Salazar, A. (2011). Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos. 3° edición.
- Soares, M.M.N.S., Poggiali, F.; Bezerra, A.C. S., Figueiredo Roberto B., P. Aguilar Maria Teresa y Cetlin Paulo Roberto (2014). The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. *Escola de Minas*, 67(1). 33-39.
- Terrones Cruz, A. (2018). Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza. (Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil). *Universidad Privada del Norte*. Trujillo, Perú.
- Tórrez Rivas, B.J., Gaitán Arévalo, J.R., Espinoza Pérez, L.J. y Escalante García, J.I. (2014). Valorización de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland. *Nexo*, 27 (2), 82-89.
- Vidal, D. V., Torres, J. y González, L. O. (2014). Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: Estudio preliminar. *Revista de Física*, 48E. 14- 23.