

PROTOTIPO DE AULA SOSTENIBLE PARA ZONAS RURALES EN PERÚ

**María T. Méndez Landa, Irma Solís Amanzo, Juan Carlos Gonzales Lévano,
Elvis Castañeda, Lucero Rodríguez**

Centro de Estudios para Comunidades Saludables, Universidad Ricardo Palma
Avenida Benavides 5440, Santiago de Surco, Lima-Perú
cecos@urp.edu.pe

Palabras clave: conglomerantes naturales, bio-fotovoltaico, autosostenible, baños secos

Resumen

Uno de los grandes problemas que afronta el Perú es la falta de infraestructura educativa y/o su falta de mantenimiento "...y... "tan solo el 9% se encuentra en buen estado...", problema que se agudiza en las zonas rurales. Otro problema que presenta es su escaso acceso a servicios básicos: "...agua potable (68,9%), electricidad (78,9%) y saneamiento (44,7%); sólo un 28,2% accede a los tres servicios...". Se planteó el diseño de un aula sostenible hexagonal con materiales de las zonas rurales: muros de tapia apisonada, techos de eucalipto y cobertura de ichu tejido. Además, se diseñó un sistema de baños secos, colector de aguas de lluvia y energía alternativa renovable. El proyecto se basa en el estudio de las características físicas del suelo a usar: un suelo arenoso con alto contenido de limos y, según la norma E.050 RNE, no es un suelo trabajable para estructuras, se recomienda estabilizar. Con el fin de mejorar sus características se trabajó adicionando a la tierra conglomerantes naturales (ceniza, carbón y cáscara de huevo) en diferentes proporciones (5%, 10% y 25%) verificando su comportamiento mediante pruebas empíricas y de laboratorio. Se encontró como la mejor mezcla a trabajar: tierra + cáscara de huevo al 5%. Así mismo a las mezclas se agregó cal hidráulica en las mismas proporciones encontrándose que la cal homogeniza la resistencia a la compresión, mejora la adherencia del material y evita la proliferación de microorganismos. El ensayo de resistencia a la compresión se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Concreto-URP obteniendo como resultado 1,6 MPa. El sistema sanitario consiste en baños secos con cámaras de almacenaje de excretas y separación de orina, así mismo cuenta con un sistema de recolección de aguas pluviales. Se propone a su vez un prototipo de generador bio fotovoltaico a partir de la recolección de energía eléctrica producida por plantas a través de la fotosíntesis, basado en los conceptos de *Energy Harvesting*.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en el Perú se ha agudizado la problemática de infraestructura educativa, según El Peruano (2 jun 2022), "...solamente el 9% de los colegios existentes se encuentra en buen estado..." La mayor problemática está concentrada en las zonas rurales donde la intervención del Estado es casi nula.

Solo los más afortunados cuentan con infraestructura producto de inversión pública del Estado. Ante esta situación, los padres de familia han solucionado este problema construyendo aulas mediante faenas comunales, por "autoconstrucción", o sea sin dirección técnica ni presupuesto adecuado para una edificación. Por otro lado, las zonas rurales en el Perú enfrentan la problemática de que "...tienen un escaso acceso a servicios básicos como el agua potable (68,9%), electricidad (78,9%) y saneamiento (44,7%); sólo un 28,2% accede al conjunto de estos tres servicios...".

Tomando en consideración esta situación, y como un aporte a las poblaciones rurales del Perú, se ha planteado el diseño y posterior construcción de un prototipo de aula sostenible, tomando en consideración los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), los que, relacionados a este tipo de construcciones sugieren: promover el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y, la resiliencia ante los desastres. Basados en estos objetivos, considerando el empleo de recursos del entorno, y, conocedores de que en las zonas rurales altoandinas el material más usado en construcción es la tierra y, la técnica

constructiva más difundida es la de tapia apisonada, se ha planteado el ecodiseño de un Prototipo de Aula, empleando este material y técnica constructiva para los muros; con una estructura de rollizos de eucalipto con cobertura de fibra de ichu (*Jarava ichu*) para el techo. Esta aula tendrá forma hexagonal, lo que permite el crecimiento progresivo de estas hasta conformar un pequeño complejo educativo de enseñanza primaria.

El objetivo del estudio consiste en conocer las características fisicoquímicas del suelo a trabajar, debido a las limitaciones que presentan las edificaciones de tierra por las características sísmicas del Perú. Se busca mejorar su comportamiento con la adición de ciertos conglomerantes naturales, a partir de los estudios de laboratorio respectivos realizados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma (URP).

Dado que el prototipo está planteado para su construcción en zonas rurales, se ha planteado como propuesta un ecodiseño de aula porque estará complementado con un sistema sanitario compuesto por baños secos con recolección de materia orgánica sólida y líquida para uso de fertilizantes y recolección de aguas pluviales, así como de un sistema de energía limpia conformada por energías renovables (paneles solares y biofotovoltaica).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema constructivo

Como fundamento del empleo de la tierra como material de construcción se ha tomado en consideración lo mencionado por Arteaga, Medina y Gutiérrez (2011, p.67), quienes sustentan que "...los materiales que emplean tierra perduran en la construcción, por su economía, porque son resistentes con un estudio del material y la estructura, y con un diseño coherente y, porque la tierra es un material abundante, reciclable y productivo..."

Analizando las virtudes e inconvenientes de la construcción con tapia, Viñuales (2007, p. 229-230) asume como el sistema idóneo para la construcción de una escuela rural en Perú por su comportamiento. La autora menciona que es:

- Excelente aislante cuando es de espesor grueso.
- Masa que permite acumular calorías, por ello es recomendable cuando se usa energía solar.
- Regulación térmica debida a la inercia de la tierra y que permite un paso de las temperaturas exteriores hacia el interior, lo que es interesante aun en el caso de climas rigurosos.
- Soporta amplitudes térmicas de más de 25°C sin rajaduras.
- Nada de humedad ambiente en el interior.
- Elasticidad relativa de la masa.
- Material económico si se encuentra en el lugar de construcción, y si se emplea tal cual o con estabilizadores económicos.
- Los principales inconvenientes son:
- Tarda en calentarse y tarda en enfriarse, necesita buenos diseños arquitectónicos para evitarlo.
- Sensibilidad importante a la humedad
- Sólo trabaja bien a la compresión.
- Necesita una buena distribución de las cargas.

En lo referente al procedimiento constructivo a emplear en los muros del aula, Arteaga, Medina y Gutiérrez (2011, p.60) también describen de manera precisa el procedimiento a seguir para su elaboración:

Tapia pisada: también conocida como tapial o tierra apisonada, es un método que utiliza una formaleta de madera, llamado tapial. La tierra usada para la tapia debe mantener la humedad óptima de compactación; cuando no es así se humedece uniformemente, evitando excesos. Sin que se trate de una regla estricta, normalmente los rangos de humedad que se requieren para elaborar tapias giran

en torno a un valor de 10%... La tierra debe ser cernida para quitar rocas de gran tamaño, y posible material orgánico, como raíces, ya que puede descomponerse y alterar las características de los muros o los bloques construidos. Para observar el grado de humedad que tiene el material, basta con tomar un puñado de tierra y oprimirlo; si la tierra no se compacta, formando una bola firme, es porque le hace falta humedad; si la tierra es pegajosa, el contenido de humedad es alto, y el suelo no servirá para compactar ... Los muros pueden ser construidos de diversas formas; la diferencia radica en el soporte y movimiento del tapial Esta técnica requiere que el material sea extendido y pisado, para compactarse formando capas de 15 a 25 cm de espesor.

La tierra apisonada o tapia pisada según Molina y Becerra (2020, p. 10), "...permite alcanzar una mayor resistencia a la compresión, en donde los límites pueden llegar hasta los 4 MPa, las paredes de tierra apisonada tienen un buen comportamiento ante la intemperie, pero no mejora su resistencia a la tracción"

En lo que respecta al diseño del prototipo, este se sustenta en la Norma E.080 (2017, p.10-11), la que menciona lo siguiente en el artículo 6.9:

Se debe evitar el deterioro de las edificaciones de tierra reforzada, causadas por el viento, la lluvia y la humedad, protegiéndose a través de:

- a) Cimientos y sobrecimientos que eviten el humedecimiento del muro.
- b) Recubrimientos, revestimientos o enlucidos que los protejan de la lluvia, humedad y viento, y que permitan la evaporación de la humedad del muro.
- c) Aleros en el techo que proteja el muro de cualquier contacto con la lluvia. En las zonas bioclimáticas indicadas en la Norma EM.110 Confort Térmico Lumínico con Eficiencia Energética, se usan aleros no menores de 1 metro de voladizo, adecuadamente anclados y con peso suficiente para no ser levantados por el viento.
- d) Veredas perimetrales con pendiente hacia el exterior de la edificación y que permitan la evacuación y evaporación del agua.

2.2 El suelo y conglomerantes

Molina y Becerra (2020, p.2) en su estudio de la tierra como material de construcción mencionan acerca de su composición que: "...recibe otros nombres como barro el cual se encuentra formado por arcilla, limo y arena muy fina; bloques de tierra compuestos por gravas, arena y gravilla, bloques de tierra arcillosa que son fabricados a mano..."

Referente a la identificación de la tierra de acuerdo con las características según el tamaño de sus partículas, Minke (2005, p.72) menciona que "...las arcillas cuentan con diámetros menores a 0.002mm, los limos entre los 0.002mm y 0.06mm seguida de las arenas con diámetros entre 0.06mm y 2mm".

Debido a que existen diferentes tipos de tierra y no todas son adecuadas para construir, según la técnica a emplear, es necesario seleccionar la tierra que permita obtener el mejor funcionamiento, siendo uno de los requisitos principales que la tierra no contenga humus. Su composición debe ser analizada detalladamente con el fin de poder aprovechar sus propiedades y determinar si es necesario o no el uso de estabilizantes (Molina y Becerra, 2020 p.).

Para la clasificación del tipo de suelo, se ha seguido el sistema de clasificación AASHTO (ASTM D-3282, 2015) el que indica para suelos arenosos lo siguiente:

Clasifica a los suelos en tres principales categorías: Suelos granulares. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es menor o igual al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-1, A-2 y A-3.

En estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz n° 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz n° 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos.

Las pruebas de resistencia realizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la URP están sustentadas en el siguiente artículo:

Artículo 8.- Esfuerzos de rotura mínimos. Ensayos de laboratorio.

8.1 Los ensayos de laboratorio de esfuerzos de rotura mínimos para medir la resistencia del material tierra a la compresión (ensayo de compresión en cubos) se realiza conforme al procedimiento siguiente:

- a) La resistencia se mide mediante el ensayo de compresión del material en cubos de 0.1 m de arista.
- b) La resistencia última se calcula conforme a la expresión siguiente: $f_0 = 1.0\text{MPa} = 10.2 \text{ kgf/cm}^2$
- c) Los cubos de adobes o muestras de tapial deben cumplir mínimo con que el promedio de las tres mejores muestras (de seis muestras) sea igual o mayor a la resistencia última indicada.

Posteriormente, según la normativa ASTM C109, en un molde triple de cobre se elaboraron las muestras cúbicas de 5x5x5 cm, para realizar los ensayos de resistencia a la compactación en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad Ricardo Palma.

Así también, Guerrero (2007 p. 186) menciona respecto a las propiedades de los suelos, que existe una relación directa entre estas y las propiedades de sus componentes. Así también se refiere a cuando la tierra es arenosa, que ésta

a pesar de poseer gran estabilidad ante los cambios de humedad o temperatura, la falta de actividad de la arcilla la hará frágil y será presa fácil de la erosión...En cambio, una tierra arcillosa tiene una alta cohesión, pero cuando se presentan fenómenos de humidificación y secado continuos, sufre cambios volumétricos capaces de generar fuertes agrietamientos en su constitución.

Respecto al comportamiento de la tierra según sus propiedades de resistencia, Molina y Becerra (2020 p.13) indican que, debido a que las construcciones en tierra, al ser expuestas a diferentes requerimientos, agentes ambientales, entre otras, sufren cambios en sus características físicas o mecánicas, por lo que se requiere de algún tipo de estabilizante que mejore sus propiedades de resistencia y de comportamiento.

Estos métodos de estabilización pueden ser de dos tipos: de tipo homogéneo, "...los que consisten en la modificación de las proporciones relativas de la granulometría natural del suelo a través del agregado de los componentes deficitarios...", y, de tipo heterogéneo que según Guerrero (2007 p.188) se conforman al:

agregar al suelo componentes ajenos a su condición natural, que le proporcionan propiedades inalterables a la presencia del agua. Según su forma de actuación sobre el suelo, estos procesos se pueden dividir en: estabilizantes por consolidación, estabilizantes por fricción y estabilizantes por impermeabilización.

Uno de los estabilizantes más empleados en las construcciones rurales de tierra en el Perú es la cal. Debido a la característica alcalina, por su pH elevado entre 12 y 13, la cal hidráulica genera dificultad en el crecimiento de los hongos y bacterias, puesto que estas se desarrollan en ambientes ácidos y neutros. Además, este material contiene óxido de calcio (CaO), el que tiene como propiedad la biocida natural, y efecto inhibitor sobre crecimiento de microorganismos como hongos y bacterias (Brown et al., 2004).

Muñoz et al. (1998, p.303) mencionan que "...los sobrenadantes de las soluciones saturadas de hidróxido de calcio micronizado y de cal de construcción son excelentes sustancias bactericidas..."

Teoría que sirve de fundamento para el desarrollo del estudio y para lo cual se trabajaron diversos ensayos de laboratorio.

2.3 Energía renovable

Como parte del proyecto, se buscó integrar un sistema de recolección de energía solar y biofotovoltaica, a fin de alimentar de manera natural las luces del aula durante las horas de ausencia de sol.

Generar electricidad a partir de un recurso tan necesario para la humanidad como lo es la vegetación, sin comprometer la estructura orgánica de la naturaleza, sería un parteaguas en el desarrollo evolutivo de la especie, esta idea surgió hace no más de una década, dando como resultado un futuro promisorio, donde hasta el momento se han conectado cargas que no requieren más de 5 volts, sin embargo la tecnología aún está lejos de ser considerada para cargas que requieren de mayor potencia eléctrica. (Zapien et al. 2019, p.2)

Este sistema de recolección biofotovoltaica permite aprovechar el proceso natural de la fotosíntesis de las plantas como fuente de energía complementaria a la energía solar, dicho proceso está basado en la liberación de materia orgánica de las plantas, a través de sus raíces, la cual es oxidada por los microorganismos que habitan el suelo como bacterias que viven alrededor de las raíces, liberando CO₂, protones y electrones. Los electrones generados de dicha oxidación son captados por el ánodo (membrana de cobre) y se consumen en el cátodo (membrana de zinc) por la reducción del oxígeno en el medio húmedo. (Salgado et al. 2019, p. 2658). "...Para el sistema fotovoltaico es recomendado emplear especies vegetales debido a que las raíces abundantes con alta capacidad de retención de humedad, de crecimiento horizontal y longitud reducida..."

Para la captación de energía es requerido el uso de electrodos de elementos como el cobre y el zinc.

Los electrodos empleados son el cobre como ánodo y el zinc como cátodo, debido a que su composición electroquímica permite una reacción redox, donde la oxidación (pérdida de electrones) y la reducción (ganancia de electrones) se realiza debido a la diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos. (Zapien et al., 2019, p.3)

2.4 Sistemas sanitarios

Como complemento de la infraestructura del escolar, se plantea un sistema de sanitario seco con separación de orina, que se asume el más apropiado como una alternativa sostenible, considerando los beneficios expuestos por Dabahh et al. (2016), en el cual mencionan que transforma las excretas humanas (potencialmente dañinas al verterse en suelos y cuerpos hídricos) en una materia inocua para la salud. Así mismo, el proceso de descomposición aprovecha los ciclos biológicos y condiciones climáticas y favorece a una tecnología sustentable cuya construcción y operación es de bajo costo.

Mediante este sistema se busca enfrentar la preocupante situación ambiental de contaminación hídrica y atmosférica provocado por el desfogue de cloacas en masas de agua. Los baños secos y su posterior tratamiento de compostaje con demás residuos orgánicos es un inicio de sostenibilidad a nivel micro con gran impacto ecosostenible, según Montes (2009, p.78):

permitiendo así la convergencia desde diferentes disciplinas y así aportar a la gestión ambiental, a la recuperación del ecosistema y a la implementación de instrumentos económicos que aporten hacia un verdadero desarrollo sostenible de las regiones, donde sus principales actores sean el hombre y la naturaleza reivindicando la relación entre ellos.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 El suelo y conglomerantes

El trabajo se inició realizando un estudio de las propiedades físicas del suelo a trabajar, en el Laboratorio de química URP. Se analizaron pH, densidad y textura del suelo, obteniéndose:

- a. pH: 5
- b. Densidad: 2.5 g/mL

- c. Textura: alto porcentaje de arena (75%) dando como resultado una tierra franco-arenosa (triángulo de textura de USDA), que tiene como característica ser áspera con partículas más finas en muy baja proporción (tabla 1). Para esto se empleó el método análisis de textura en botella (probeta), por sedimentación, prueba referencial empleada para trabajo de campo.

Tabla 1. Análisis de textura del suelo (análisis de botella)

Total	24 mL	100%
Arena	18 mL	75%
Limo	5.9 mL	24.6%
Arcilla	0.1 mL	0.4%

Con el fin de comprobar con exactitud esta prueba previa, se realizó el análisis granulométrico en el Laboratorio de Mecánica de Suelos URP, encontrándose que el suelo tiene granos gruesos debido a que el porcentaje retenido en la malla N°200 (0,075 mm) es menor al 50%, además de ser clasificado como arenoso por el porcentaje retenido que se observa en la malla N°4 (0,475mm). Con un coeficiente de uniformidad mayor a 6 y su coeficiente de curvatura menor a la unidad, la muestra es considerada mal graduada debido a que no cumple con los dos requerimientos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos la arena bien graduada

Coeficiente de uniformidad	$C_u > 6$
Coeficiente de curvatura	$1 < C_c < 3$

Con los resultados de las pruebas realizadas se definió la tierra a utilizar como arena limosa, la cual como se mencionó anteriormente, "... a pesar de poseer gran estabilidad ante los cambios de humedad o temperatura, la falta de actividad de la arcilla la hará frágil y será presa fácil de la erosión..." (Guerrero, 2007, p.186)

Así también, respecto al comportamiento de la tierra en cuanto a sus características mecánicas, se requiere la utilización de algún tipo de estabilizante a fin de mejorar sus propiedades de resistencia y de comportamiento (Molina y Becerra, 2020 p. 13)

Con el fin de seleccionar posibles estabilizantes a emplear, que sean fáciles de socializar en las poblaciones rurales. Se analizaron las costumbres de una familia rural típica, concluyendo que los insumos con mayor facilidad de obtener en estas zonas son la ceniza y el carbón como producto de las cocinas a leña que emplean en sus viviendas, así como la cáscara de huevo producto de la crianza de aves de corral.

Es así como se definieron tres tipos de conglomerantes a analizar posteriormente, en mezcla con tierra a diferentes porcentajes (5%, 10% y 25%): ceniza, cáscara de huevo y carbón.

Dado que la tierra es muy susceptible a la humedad y los insectos, se buscó un conglomerante que es conocido y empleado en las zonas rurales del Perú como es la cal hidráulica. Con el fin de comprobar su comportamiento se trabajó con las muestras de tierra, adicionando cal hidráulica a cada uno de los tres conglomerantes al 5%.

3.2 Energía alternativa

Para el presente estudio se realizaron pruebas de medición de voltaje en plantas como la sábila (*Aloe Barbadensis Miller*), siempreviva (*Kalanchoe*), lengua de suegra (*Dracaena trifasciata*) y San Pedro (*Echinopsis Pachnoi*), elegidos para el presente estudio (figura 1).

Posteriormente se procedió a realizar un prototipo de recolección y detección de flujo de electrones para obtener una mejor información del voltaje, así como también de la temperatura en la que se encuentran las plantas debido a que es necesario poder (figura 2).



Figura 1. Medición en diferentes tipos de plantas (CECOS 2023)

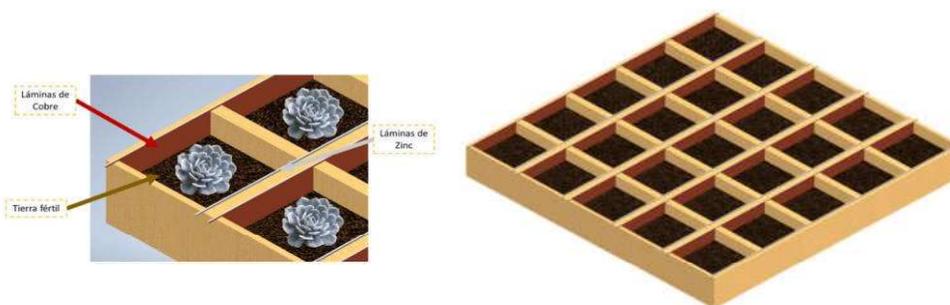


Figura 2. Prototipo de maceta para recolección

3.3 Sistema sanitario

Se plantean baños secos como alternativa sanitaria en zonas rurales ante la falta de sistemas de abastecimiento de agua y desagüe. La investigación consistió en el diseño de un sistema sanitario considerando recomendaciones de autores en diferentes contextos socio urbanos, los cuales identificaron los materiales y funcionamiento en conjunto. El proceso de implementación de la propuesta está basado en diferentes experiencias y estudios para la optimización del sistema, reducción de olores y de gases contaminantes, constando de cinco fases (tabla3).

Tabla 3. Fases de implementación y uso de baños secos

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Recopilación de materiales in situ para reducir costos de transporte. También se realiza la preparación de terreno. Se ubica estratégicamente dentro del complejo educativo evitando estar cercano a las aulas	Los baños secos son diferentes por el tipo de aparato sanitario para la orina; estos son guiados por tuberías a recipientes separados para posteriormente ser utilizados como fertilizantes	Cambio de cámara de almacenaje que, según Dabahn et al. (2016, p.7), podría ser a cada 18 meses en zonas más frías y a cada 6 meses en zonas calientes	Proceso de deshidratación, para lo cual se adiciona material secante después de cada uso, que, según lo más usado por la población, puede ser tierra con ceniza, aserrín o cal; este último es de gran beneficio ya que actúa como bactericida	Compostaje, posterior al periodo de deshidratación puede ser utilizado como abono o enterrado, con este proceso no se contaminan los suelos. En todo el proceso se ventila y para evitar ingreso de insectos y plagas filtra mediante trampas incorporadas a las cámaras de almacén

El sistema sanitario se complementa con la recolección de agua, tanto de neblina como de lluvias, las cuales son almacenadas y se requiere de un proceso de purificación previo a su uso para lavado de manos y limpieza (tabla 4).

Tabla 4. Proporciones para purificación de agua (OMS, 2017)

Volumen de agua	1 cuarto/litro	1 galón	2 galones	4 galones	8 galones
Cantidad de lejía de 6% que debe agregar	2 gotas	8 gotas	16 gotas de (1/4 de cucharadita)	1/3 de cucharadita	2/3 de cucharadita

4. RESULTADOS

Una vez definidos los conglomerantes y las proporciones a utilizar, se procedió a realizar las diferentes pruebas en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la URP. Como primer paso se realizaron ensayos de laboratorio para obtener una clasificación del suelo utilizado según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

4.1 Clasificación del suelo

Tabla 5. Análisis granulométrico

Tamiz		% acumulado que pasa
Apertura (mm)	ASTM	
75	3"	100
50	2"	100
37.5	1 1/2"	100
25	1"	100
19	3/4"	100
9.5	3/8"	100
4.75	N° 4	100
2.0	N° 10	99.96

Tamiz		% acumulado que pasa
Apertura (mm)	ASTM	
0.85	N° 20	97.81
0.425	N° 40	84.59
0.250	N° 60	68.79
0.150	N° 100	52.59
0.075	N° 200	33.88
Coeficiente		
Uniformidad	Cu	6.12
Curvatura	Cc	0.72

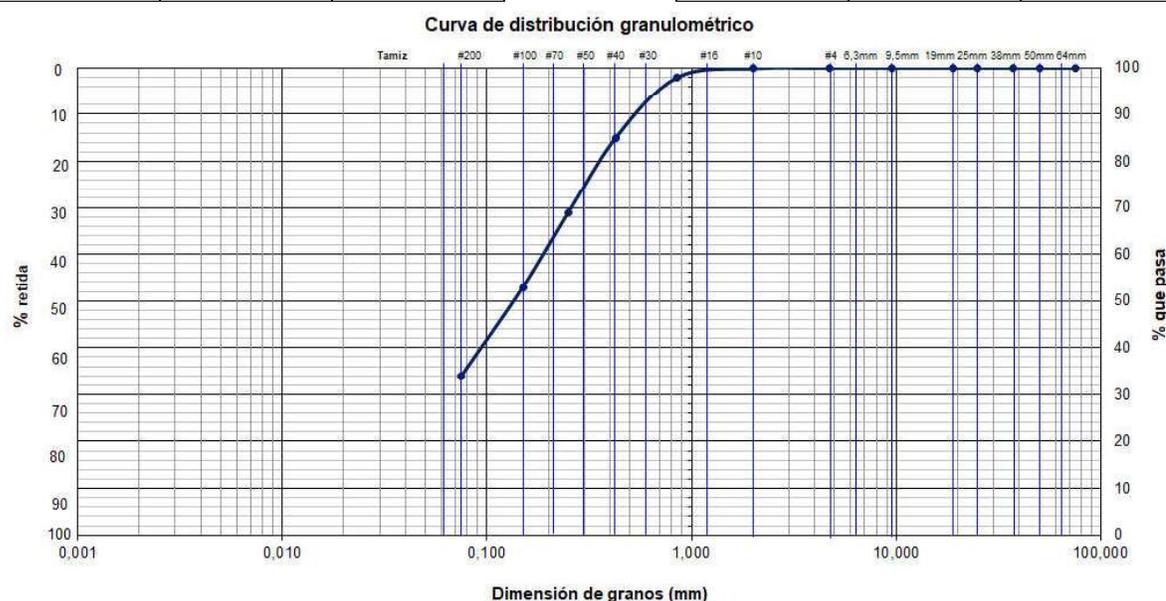


Figura 3. Distribución granulométrica

Mediante el SUCS, el análisis granulométrico de la muestra del material (tabla 5) permite concluir que:

- a. El suelo tiene granos gruesos ya que el porcentaje retenido en la malla N°200 (0,075 mm) es menor al 50%, además de ser clasificado como arenoso (S) por el porcentaje retenido que se observa en la malla N°4 (4.75 mm).
- b. Con un coeficiente de uniformidad mayor a 6 ($C_u = 6.12$) y su coeficiente de curvatura menor a la unidad. ($C_c = 0.2$) la muestra es considerada arenosa mal graduada debido a que no cumple con los dos requerimientos expuestos en la tabla 2

Teniendo en consideración que la muestra ha dado como resultado un suelo mal graduado, las consecuencias para la elaboración de tapial serían una compactación deficiente y la inconsistencia en sus propiedades mecánicas, que podrían causar problemas al momento de la construcción. Según Guerrero (2007, p.187), "...si se pretende edificar tapias, es conveniente que el contenido de arcilla sea mayor debido a que se requiere poca agua para su elaboración...", por lo tanto, se buscó mejorar las propiedades de la tierra haciendo uso de conglomerantes naturales que presenten facilidades de obtención en zonas rurales del Perú, es por este motivo que se optó por: ceniza, cáscara de huevo y carbón.

4.2 Determinación de resistencia a la compresión

Para el ensayo a la compresión en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Ricardo Palma, primero se tuvo que elaborar los cubos de 5cm x 5cm x 5cm, con las mezclas previamente dosificadas de tierra y agua con ceniza, con cáscara de huevo y con carbón. Posteriormente, en un molde triple de cobre según la normativa ASTM C109, se hizo la preparación de cada muestra a ensayar, tal como se observa en la figura 4.



Figura 4. Moldes con el material a ensayar

Las tablas 6 y 7 y la figura 5 presentan los resultados de la resistencia a la compresión de las mezclas con conglomerantes naturales sin y con adición de cal. La tabla 8 presenta resultado de resistencia a la compresión de la tierra sin conglomerante y si cal.

Tabla 6. Resultados de resistencia a la compresión de muestras sin cal

Conglomerante natural	Resistencia a la compresión (MPa)					
	5%		10%		25%	
	Individual	Promedio	Individual	Promedio	Individual	Promedio
Carbón	1.46	1.42	1.02	1.06	-	-
	1.42		1.06			
	1.38		1.09			
Ceniza	0.58	1.10	1.10	1.06	1.30	1.24
	1.27		1.06		1.24	
	1.45		1.01		1.18	
Cáscara de Huevo	1.57	1.61	1.11	1.08	1.26	1.33
	1.61		1.11		1.41	
	1.64		1.02		1.33	

Tabla 7. Resultados de resistencia a la compresión de muestras con cal

Conglomerante natural y cal	Resistencia a la compresión (MPa)					
	5% + 5% de cal		10% + 10% de cal		25% + 25% de cal	
	Individual	Promedio	Individual	Promedio	Individual	Promedio
Carbón	1.70	1.57	1.09	1.10	-	-
	1.58		1.07			
	1.44		1.15			
Ceniza	1.00	0.96	1.55	1.50	1.00	0.97
	0.96		1.48		0.99	
	0.92		1.49		0.92	
Cáscara de Huevo	1.03	1.02	1.21	1.21	1.23	1.25
	1.04		1.21		1.27	
	1.00		1.21		1.25	

Tabla 8. Resultados de resistencia a la compresión de muestras sin conglomerantes ni cal

Descripción de la muestra	Resistencia a la compresión (MPa)	
	Individual	Promedio
Tierra sola	1.39 1.33 1.38	1.36

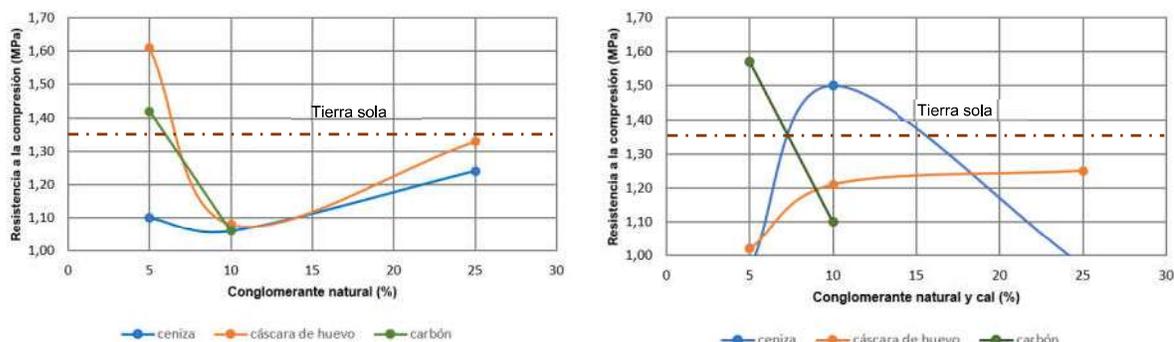


Figura 5 – Comportamiento de la resistencia a la compresión en muestras de tierra con conglomerantes naturales sin y con cal

Las muestras preparadas con 25% de carbón, sin o con cal, presentaron demasiadas fisuras, imposibilitando su ensayo para determinar la resistencia a la compresión.

El conglomerante cáscara de huevo a 5%, sin cal, fue lo que ha presentado la mejor resistencia a la compresión (figura 5).

El análisis del comportamiento de las muestras de tierra adicionadas a cal hidráulica a cada uno de los tres conglomerantes, visualizadas en la figura 4, indican:

- el conglomerante ceniza al 10% con 10% de cal ha presentado una resistencia promedio elevada y diferente de la adición de 5% con 5% de cal y 25% y 25% de cal;
- el conglomerante carbón al 5% con 5% de cal ha presentado la mejor resistencia a la compresión;
- el conglomerante cáscara de huevo al 25% con 25% de cal ha presentado una resistencia promedio de 1.25 MPa con tendencia a su mantención.

En la comparativa de las muestras de los conglomerantes de forma individual y adicionadas de cal hidráulica con las muestras de tierra sola se observaron mejoras de la resistencia para algunas dosificaciones.

4.3 Sistema sanitario

El sistema sanitario consiste en un módulo de cuatro cámaras de almacenaje de las excretas y un sistema de recolección de aguas pluviales con un atrapaniebla, para su empleo en lavado de manos y limpieza.

El módulo de baño seco está conformado por espacios diferenciados por el tipo de aparato sanitario para los niños y las niñas. Los desechos son conducidos a cámaras especialmente diseñadas para su tratamiento de compostaje y posterior uso como abono. El módulo propuesto reduce los desechos sólidos mediante un proceso de deshidratación y descomposición.



Figura 6. Esquema general del sistema y funcionamiento del módulo de baño seco

Las orinas se recolectan en un recipiente de plástico oscuro que posteriormente procederá a ser reposado por siete días para completar el ciclo de sedimentación de sales y las reacciones químicas necesarias para su uso como fertilizante. Los recipientes deben permanecer tapados y bajo sombra.

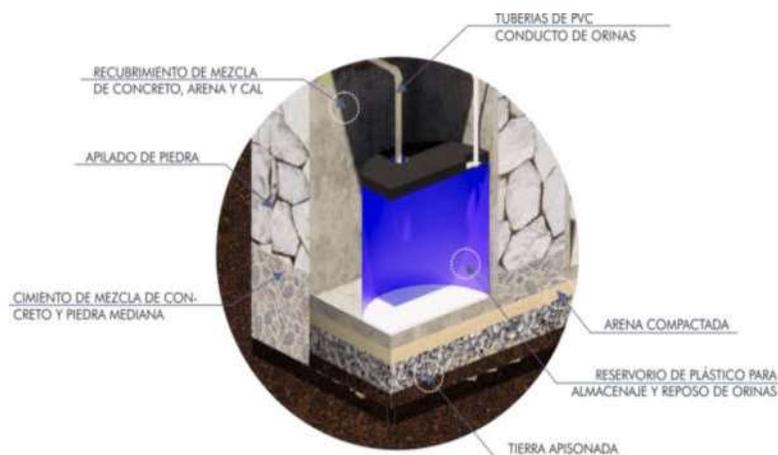


Figura 7. Sistema recojo de orina

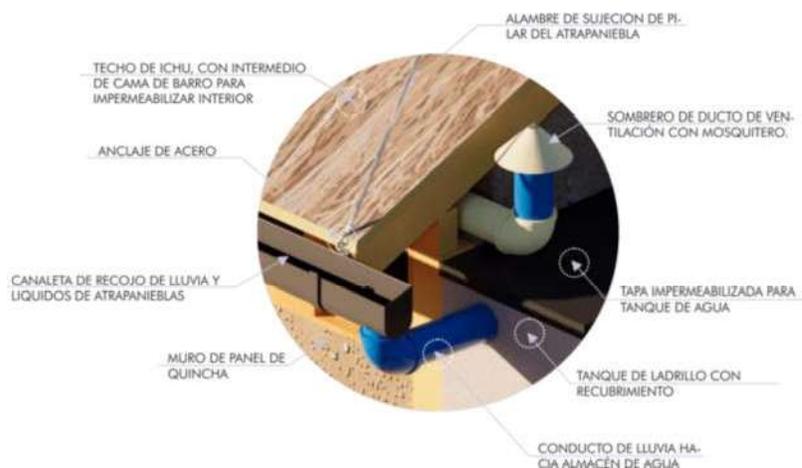


Figura 8. Recojo de lluvias y ventilación

Es importante la ventilación de las cámaras de excretas, por lo que en cada una de ellas se ubica una tubería conectada a un desfogue en la parte superior con sombrero de ducto para evitar el ingreso de lluvias. Se recomienda incluir un filtro de malla para evitar el ingreso de insectos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- C1. El presente estudio ha permitido comprobar que se puede mejorar suelos deficientes haciendo uso de conglomerantes naturales.
- C2. La mezcla de tierra + cáscara de huevo al 5% como conglomerante natural presentó la mejor resistencia.
- C3. En cuanto a los resultados de la resistencia a compresión se concluye que las mezclas de tierra + conglomerantes naturales que presentaron los mejores resultados fueron: cáscara de huevo al 5%, carbón al 5% con 5% de cal, y ceniza al 10% con 10% de cal.
- C4. Los resultados obtenidos permiten concluir que adicionar cal a la mezcla posibilita homogeneizar su resistencia a la compresión, así como mejorar el proceso de secado y evitar la proliferación de hongos y microorganismos. Siendo sustentado en base a la propiedad alcalina del material, lo cual influye en la estabilización del pH.
- C5. El presente estudio deja abierta la posibilidad de continuar con posteriores pruebas de comprobación del comportamiento de la cáscara de huevo como el conglomerante idóneo para mejorar la resistencia de la tierra.
- C6. Considerando las limitaciones de infraestructura en las zonas rurales del Perú, se ha tomado en cuenta el empleo de baños secos como un mecanismo de gestión de residuos

sólidos ecológico, alternativo al cloacal, ya que permite su uso posterior como abono y fertilizante para futuros cultivos sin impactar el medio ambiente.



Figura 9 - Vista general del Complejo Educativo

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Arteaga, Medina y Gutiérrez (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. Colombia: Revista Facultad de Ingeniería, 20(31), 55-68. Disponible en: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1421>

ASTM D-3282 (2015) Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. USA: ASTM International

Brown, T.; LeMay, H.; Bursten, B.; Burdge, J. (2004). Química. La ciencia central. México: Pearson Educación. <https://academia.utp.edu.co/quimica2/files/2018/09/quc3admica-la-ciencia-central-brown.pdf>

Dababh, F.; Escudero, H.; Fernandez Curutchet, M.; Hock, D. (2016). Sistema de saneamiento seco con separación de orina (baño seco). Manual Técnico. Instituto Nacional de Tecnología Ambiental. Argentina

Guerrero L. (2007). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. Apuntes, Bogotá, v.20, n.2. p. 182-201

Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Uruguay: Fin de siglo.

Montes, K. (2009). Análisis de la contribución de los sanitarios secos al saneamiento básico rural. Pontificia Universidad Javeriana

ONU (2015). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Naciones Unidas. <https://cutt.ly/HwtfZoCN>

OMS (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. <https://cutt.ly/cwtfZZZo>

Molina Contreras, D.; Becerra, J. E (2020). La tierra como material de construcción, propiedades y estabilizantes. Universidad Santo Tomás.

Muñoz Ruiz, C.; Collazo Ponce, A.; Alvarado, F. (1995). Efecto bactericida de la cal hidratada. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/15600/v118n4p302.pdf>

Norma E.050 (2020). Suelo y cimentaciones. Perú: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción.

Norma E.080 (2017). Diseño y construcción con tierra reforzada. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Disponible en: <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=3478>

Norma EM.110 (2016) Confort térmico y lumínico con eficiencia energética. Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619729-em-110-confort-termico-y-luminico-con-eficiencia-energetica>

Salgado, M.; Zepeda J.; Zepeda-Hernández; J.; Cid del Prado, M.; Villalobos, J.; Cruz, R. (2019). Celda biofotovoltaica para la generación de energía eléctrica a través de plantas vivas. Academia Journals p.2658-2664

Valdivia, M. R. V. (2022, junio 2). Infraestructura educativa en el Perú: agravación del persistente problema durante la pandemia. *Económica*. <https://cutt.ly/swtfZb77>

Viñuales, G. M. (2007). Tecnología y construcción con tierra. *Apuntes*, 20(2). <https://cutt.ly/fwtfZT5d>

Zapien, J.; Solorio, B.; Ballesteros, J.; Núñez, F., (2019). Generación eléctrica a partir de la fotosíntesis natural; ¿Una realidad escalable? *Revista de Energías Renovables*, 3(1) 1–6. <https://doi.org/10.35429/jre.2019.10.3.1.6>

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al Doctor Iván Rodríguez Chávez, Rector de la Universidad Ricardo Palma, por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Los autores agradecen a los alumnos voluntarios del Centro de Estudio para Comunidades Saludables, en especial a Alejandro Milla, Thomas Polo, Yennifer Alarcón, Josué Castro, Valeria Córdor y Julio Rafael y demás miembros voluntarios por su apoyo en la elaboración del presente proyecto.

Todos los ensayos y respectivas imágenes fueran realizados en el Centro de Estudio para Comunidades Saludables

AUTORES

María T. Méndez Landa, Doctora en Educación por la Universidad San Martín de Porres. Arquitecta por la Universidad Nacional de Ingeniería. Profesora Principal en las facultades de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú. Coordinadora y directora de proyectos de investigación del Centro de Estudios para Comunidades Saludables y jefe del Taller de Construcción de la Facultad de Ingeniería. Universidad Ricardo Palma. Directora de ponencias presentadas al TerraBrasil 2008, 2010 y 2012, SIACOT 2009, NOCMAT 2013, Ekotectura 20014 y TerraBrasil 2014.

Irma Solís Amanzo, Doctora en Salud Pública por la Universidad Federico Villareal 2016. Ingeniera Química en la Unión Soviética Ucrania. Jefa del Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería. Profesora de Química en la facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú

Juan Carlos Gonzales Lévano, Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Ricardo Palma, actualmente encargado del Laboratorio de Simulación Sísmica de la Universidad Ricardo Palma.

Elvis Castañeda, alumno de Ingeniería Civil. Universidad Ricardo Palma. Miembro voluntario del Centro de Estudio para Comunidades Saludables – CECOS BRIGURP.

Lucero Rodríguez, alumna de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Ricardo Palma. Miembro voluntario del Centro de Estudio para Comunidades Saludables – CECOS BRIGURP.