

ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO PARA EL RELLENO SANITARIO DE MACHU PICCHU Y PUEBLOS ALEDAÑOS

Enrique Guadalupe G. *, Manuel Zea A. **, Iris Villafuerte S. ***, Dante Flores O. ***

RESUMEN

El Santuario Histórico de Machu Picchu, así como los pueblos de Ollantaytambo, Urubamba, Guayllabamba y Yucay presentan una gran problemática para la disposición final de los desechos sólidos que ellos generan. Estos desechos crean focos de infección por su tratamiento inadecuado, contaminando el Valle Sagrado de los Incas, el río Urubamba y otros lugares.

Razón por la cual, se ha proyectado un Relleno Sanitario Manual en el área de Yuncacha Huayco, en el distrito de Urubamba, para lo cual se presenta el Estudio Geológico- Geotécnico, que abordará los temas de geomorfología, estratigrafía, geología económica, suelo, subsuelo, condiciones de cimentación, análisis de estabilidad de taludes, diseño antisísmico y otros.

Palabras Clave: Geología, Geotecnia, Relleno Sanitario, Machu Picchu.

Abstract

The historical Sanctuary of Machu-Picchu, as well as the towns of Ollantaytambo, Urubamba, Guayllabamba and Yucay, face the big problem of the final disposal of their self-generated solid waste. This waste creates infection focuses because of an inappropriate treatment, thus polluting the Sacred Valley of the Incas, Urubamba River and some other places. That is the reason why a manual sanitary fill in the Yuncacha Huayco area, in the District of Urubamba, has been projected. For this purpose, a geological-geotechnical study on this is presented, dealing with subjects such as geomorphology, stratigraphy, economic geology, soil, subsoil, foundation conditions, slope stability analysis, and earthquake-proof design, among others.

Key Words: Geology; Geotechnics; Sanitary fill.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un proyecto para construir un relleno sanitario manual, para lo cual se han realizado los estudios básicos, desarrollando la topografía, estudiando la geología en sus diversos aspectos, como la geomorfología, estratigrafía, geología estructural, petrografía, geodinámica, geología económica, geotecnia, hidrología e hidrogeología. Proponiendo finalmente recomendaciones para la construcción del relleno sanitario, que es una obra de gran prioridad en la zona, ya que el país gracias a Machu Picchu tiene un flujo de miles de turistas que generan divisas y es necesario evitar la contaminación del Va-

lle Sagrado de los Incas y por ende el deterioro de la imagen del país.

II. OBJETIVO

Realizar un estudio geológico-geotécnico para conocer la factibilidad de la construcción de un relleno sanitario manual en Yuncacha Huayco.

III. HIPÓTESIS

La geología del área de Yuncacha Huayco es adecuada para la construcción del relleno sanitario manual para evitar la contaminación del Valle Sagrado de los Incas.

* Docente UNMSM y PUCP, e-mail: eguadalupe@unmsm.edu.pe

** Docente UNMSM.

*** Promoción del Desarrollo Sostenible (IPES).

IV. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología usada es de tipo exploratorio y descriptivo. Se inicia con trabajos de exploración de campo, luego el muestreo, seguido del análisis de laboratorio, para finalmente a la luz de los resultados ver la factibilidad del proyecto de relleno sanitario.

V. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

El área escogida para el relleno sanitario tiene como nombre Yuncacha Huayco, que pertenece a la Comunidad Campesina de Paucarbamba, políticamente pertenece al distrito de Urubamba y departamento de Cusco.

A Yuncacha Huayco se accede por vía terrestre y ferroviaria desde el Cusco y está interconectada con varios pueblos como Ollantaytambo, Paucarbamba, Urubamba y otros.

VI. ASPECTOS GENERALES

El área de Yuncacha Huayco es una quebrada de dirección N-NE, cuyas pendientes varían entre 70-80% en la parte alta, mientras que en la parte baja varía entre 8,5-16%. En la parte baja se dará la disposición final de los residuos sólidos provenientes del Santuario Histórico de Machu Picchu, ciudad de Ollantaytambo, Urubamba, Huayllabamba y Yucay.

El total de la población beneficiaria es de 16 430 habitantes, proyectando la población al año 2021 ésta será de 28 732 habitantes. Se ha considerado la generación o producción domiciliaria per cápita de 0,496 kg/hab-día de residuos sólidos, haciendo un total de 16,44 ton/día de residuos totales de los cinco distritos.

El Santuario Histórico de Machu Picchu (SHMP) con gran actividad turística y el comercio genera 4,662 ton/día de residuos sólidos, siendo el 63,45% materia orgánica, seguida de plásticos con 11,46%, papeles 9,34% y vidrio 3,2%. Todos los residuos sólidos generados en los cinco distritos no tienen el tratamiento adecuado, ya que se queman, se arrojan al río o se desperdigan, creando focos de infección y contaminación ambiental, en especial al río Urubamba y al Valle Sagrado de los Incas. Es en este contexto que se realiza el estudio geológico, geotécnico y ambiental, para la puesta en marcha del Proyecto de Relleno Sanitario.

6.1 CLIMA Y METEOROLOGÍA

El área de estudio presenta características de valles interandinos, según la clasificación ecológica

de Holdrige, la zona corresponde a una zona Estepa Espinosa Montano Bajo Subtropical (ee-MBS).

El clima de la zona es seco y frígido, con grandes precipitaciones pluviales en épocas de invierno (diciembre a marzo) y la época seca entre mayo y octubre.

La precipitación en el área de la cuenca es de 496,17 mm/año que corresponde a una media de los 10 últimos años. La temperatura media anual es de 16,69 °C. La dirección predominante de los vientos es de sentido oeste, con velocidades máximas de 2-3 metros por segundo, con mayor predominio entre las 10 a 17 horas.

6.2 GEOMORFOLOGÍA

Unidades geomorfológicas

- a) Cerros escarpados. Es una unidad que se encuentra al sur del área caracterizada por tener pendientes abruptas entre 70-80%. En esta geoforma se dan los procesos de captación del agua de lluvia, por lo que cumple la función de una cuenca de recepción del agua que fluirá por las cárcavas.
- b) Cárcavas. Son geoformas originadas por la erosión hídrica, por allí discurre el agua en épocas lluviosas y está conformada por dos cárcavas principales en la parte baja que se alimenta de una red de drenaje que la llamamos cárcavas secundarias. Éstas se encuentran en número de 10 con anchos variables desde 0,50-7 m. Las cárcavas principales alcanzan los 20 m, se han formado por erosión de los depósitos de flujos de barro.
- c) Conoide de depósito de flujos de barro I. Depósitos formados en épocas pasadas, cuando la incidencia de lluvias era mayor en comparación con los actuales niveles, los flujos de barro se deslizaron quebrada abajo y formaron un conoide que superficialmente tienen forma de abanico. Su pendiente promedio es de 15%, se encuentran emplazadas cubriendo las terrazas fluviales antiguas del río Urubamba.
- d) Conoide de depósitos de flujo de barro II. Son depósitos formados por erosión del flujo de barro antiguo I, esta erosión formó las cárcavas y esos materiales fueron depositados al pie de éstas a manera de pequeños conos.
- e) Terrazas fluviales. Se encuentran en un número de cuatro terrazas, que a continuación serán descritas:
Terraza 1. Es la terraza más antigua formada por el río Vilcanota, se encuentra ubicada en la parte alta, al margen derecho del río Vilcanota.

Actualmente, se encuentra una cantera en explotación.

Terraza 2. Esta peneplanicie es reducida en dimensiones y se encuentra al este y en la parte baja del área de estudio. Actualmente es usada como tierra de cultivo, colinda al noreste con los cerros escarpados y al oeste con los depósitos de flujos de barro.

Terraza 3. Esta terraza se encuentra al este de los flujos de barro y es una planicie amplia donde se desarrollan las mejores tierras de cultivo.

Terraza 4. Esta terraza es la más reciente y reducida. Se encuentra junto al río Urubamba.

- f) Grietas y Cavernas de Disolución. Estas grietas se observan en el miembro Maras II y especialmente en el miembro Maras III, cuyas conformaciones son básicamente de yeso; las rocas por acción de las aguas de las lluvias o escorrentías tienden a disolverse formando grietas y cavernas de diversas dimensiones, pudiendo alcanzar hasta los 4 metros. Algunas de estas grietas corren en forma transversal a las cárcavas.

El estudio considera que algunas áreas de Maras III, donde hay presencia de grietas y cavernas pueden causar inestabilidad, si sobre ellas se proyectan las obras, por ello las celdas del relleno sanitario no deberán proyectarse sobre éstas. Como límite máximo de diseño en la parte superior del área del proyecto, se tendrá en cuenta la base del banco de roca deslizada antiguamente, actualmente estable.

6.3 GEOLOGÍA GENERAL

6.3.1 Estratigrafía

Haciendo un recuento de la estratigrafía del área donde se asentará el relleno sanitario tenemos:

- a) Formación Maras. Según la Carta Geológica Nacional, regionalmente en el el área de estudio aflora la Formación Maras como parte del Grupo Yuncaypata, ésta yace concordantemente a la Formación Paucarbamba, se trata de una secuencia caótica como una mezcla de yesos, lutitas y escasas calizas, se estima que tiene un grosor de 100 y 200 metros y se le asigna una edad Albiano Medio (cretáceo inferior).

Para el trabajo específico en el área se ha diferenciado la Formación Maras en 3 miembros que detallamos:

- Miembro Maras I: Se encuentra en la base de la columna estratigráfica y está conformado por estratos de yeso, con escasos horizontes de arcillitas y limolitas rojas o areniscas rojizas. Este miembro se caracteriza por

haber sufrido fuertes deformaciones debido al tectonismo; el carácter plástico del yeso ha contribuido a formar pliegues irregulares con varias fallas. Este miembro aflora al este del proyecto, en los cerros escarpados y se prolonga hacia el noreste.

- Miembro Maras II: Estratigráficamente subyace al Maras I. Este miembro está compuesto mayormente de areniscas rojizas de grano fino a medio con escasos horizontes arcillo-limosos, tiene un rumbo promedio de N43E, buzamiento 47NW. Este miembro aflora principalmente en el flanco Oeste de los cerros escarpados.
- Miembro Maras III: Se compone mayoritariamente de secuencias alternantes de lutitas y limolitas, en horizontes delgados, las secuencias arcillosas presentan coloración verdosa, se pueden observar también escasos niveles de areniscas y abundante contenido de yeso entre las capas.

Estas rocas que pertenecían a la parte alta de la columna estratigráfica tienen evidencia que se han deslizado a la parte baja y actualmente ocupan la parte sur del área.

- b) Depósitos Fluviales. Son originados por la acción erosiva y de sedimentación del río Urubamba durante el cuaternario. Específicamente el área del futuro relleno sanitario en gran parte está cubierta por los depósitos de flujos de barro y en el sector noreste se encuentran los depósitos fluviales (Terraza II), que servirán como base para la futura carretera hacia el relleno. Cubriendo a estos depósitos conglomerádicos se encuentra una capa de suelo orgánico negruzco de 20-40 centímetros de espesor y en otras zonas está cubierta por los flujos de barro.
- c) Depósitos Aluviales. Geomorfológicamente se denomina conoide de depósito de flujos de barro; estos depósitos aluviales en el área de estudio se encuentran sobreyaciendo a la Terraza II y se formaron cuando el clima era muy lluvioso y el agua erosionaba fuertemente los cerros escarpados; todo este material fino y grueso lo transportaba como flujos de barro y se depositaban en la parte baja formando el conoide. Luego, como último acontecimiento geológico tenemos que en épocas recientes con un clima moderado, el agua ha erosionado estos depósitos formando las dos cárcavas principales.

Estos depósitos están constituidos principalmente por sedimentos finos, y la otra parte arenoso a limosa-arcillosa de colores rojizos a grises con la presencia de pocos clastos angulosos, todos ellos provenientes de la erosión de la Formación Maras.

6.3.2 Geología Estructural

Regionalmente el área de estudio pertenece, estructuralmente al Domo de Maras que se ha formado por varias fases tectónicas. Dichos movimientos tectónicos han actuado de diversas maneras; así por ejemplo, Maras I compuesta de arenisca ha sufrido poca deformación, en cambio Maras II compuesta mayoritariamente de yeso por su plasticidad ha sufrido gran deformación y también Maras III conformado por arcillitas-limolitas con yeso.

Detallando la geología estructural local tenemos fallamiento principal, que es por movimiento en bloques, como se puede observar en el extremo noreste del área de estudio. Se tiene dos juegos principales de fallamiento: el primero N35°-45°W y el segundo N50°-70°E. Dichas fallas o fallas inferidas no muestran movimientos neotectónicos, porque los materiales cuaternarios mantienen sus formas originales. Por lo que tectónicamente es factible la construcción del relleno sanitario.

También se han realizado mediciones de fracturamiento en los afloramientos de roca, encontrándose tres juegos principales: a) Rumbo S30W Buzamiento 34°NW, b) Rumbo S22W Buzamiento vertical, c) Rumbo S70W Buzamiento 47°SE.

6.3.3 Petrografía

Se presenta la descripción petrográfica de 3 muestras representativas resumidas en el siguiente cuadro:

CARACTERÍSTICAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
LUGAR DE MUESTREO	Se extrajo del miembro Maras I.	Se extrajo del miembro Maras II.	Se extrajo del miembro Maras III.
COLOR	Blanquecino.	Pardo rojizo.	Rojizo y blanco en franjas.
TEXTURA	Masiva a algo cristalizada.	Estratiforme fina.	Estratiforme.
ORIGEN	Roca sedimentaria formada por precipitación química.	Roca sedimentaria detrítica – química.	Roca detrítica – química.
MINERALOGÍA	Casi en su totalidad yeso, con impurezas de arcilla.	Cuarzo, ferro magnesianos, yeso, calcita.	Arcilla rojiza, yeso, calcita.
DESCRIPCIÓN	En la muestra, no se observa la estratificación y el yeso está en diversas formas (masiva, granular, fibrosa) es el componente mayoritario.	La roca tiene estratificación fina, en el microscopio se observa minerales blancos, algunos con cierta cristalización que al echarle ácido clorhídrico parte de estos minerales efervescen, lo cual confirma la presencia de calcita y las que no efervescen, serían de yeso.	La muestra tiene cierta estratificación con capas de hasta 3 mm. de yeso en alternancia con capas finas de arcillita, al echarle el ácido clorhídrico parte de la muestra efervece.
LITOLOGÍA	Yeso con impurezas de arcilla.	Arenisca fina calcárea yesífera.	Limolita - arcillita yesífera.

6.3.4 Procesos de geodinámica que pueden afectar a las obras

De acuerdo a las condiciones climatológicas que existen en el área pueden darse los siguientes fenómenos:

- a) Flujos de barro y torrenteras. Si bien es cierto que la cuenca de recepción es de sólo 59 125 m², pero si ocurrieran lluvias torrenciales excepcionales de gran magnitud, podrían formarse flujos de barro por lavado de los cerros y removilización de los depósitos de lodo y barro existentes bajando estos flujos de lodo y barro que pueden causar daños. Pero estos fenómenos sólo son de carácter excepcional, lo que va a ocurrir frecuentemente es la escorrentía de aguas por los canales.

Para mitigar los posibles efectos de los flujos de barro y torrenteras se proyectará la construcción de un canal de captación de aguas fluviales, el cual no permitirá que confluyan las diversas aguas de las laderas y pequeñas quebradas para formar flujos de barro o torrenteras. Además del dren de captación de aguas pluviales, en el proyecto se proyectarán la construcción de zanjas paralelas a las curvas de nivel, en la parte alta de los 2 drenes a proyectarse, con la finalidad de disipar el flujo de aguas pluviales, disminuyendo el caudal de ingreso a los drenes laterales. En épocas de lluvia, los canales de captación de agua deben tener una limpieza continua, para evitar el estancamiento y desborde del agua, así como para evitar la erosión y disolución de zonas, especialmente de yeso.

- b) Grietas y cavernas de disolución: Este proceso de disolución del yeso es progresivo, pues el yeso es un mineral que tiene solubilidad ante las aguas de lluvia y las aguas generalmente corren por fracturas o fallas o alguna superficie de discontinuidad y poco a poco va horadando las rocas y en parte esta disolución vuelve a redepositarse en otro lugar; pero, lo que al final podemos tener es cavernas y grietas como se observa principalmente en Maras III que pueden causar daños o inestabilidad a obras que se construyan sobre ellas.
- c) Deslizamiento y hundimientos de suelos y rocas. Estos procesos pueden generarse por acción de la meteorización y erosión, principalmente por el proceso de disolución, el cual con el correr de los años puede ocasionar que los bloques expuestos se deslicen, como al parecer ocurrió con el Maras III que se ha deslizado y que se encuentra ahora en la parte central de la quebrada. Asimismo, podría ocurrir pequeños hundimientos debido a la formación de cavernas, sin embargo, es poco probable, ya que el yeso se está redepositando cerca al área de aporte. En cuanto a deslizamiento y hundimientos de suelos y rocas, es poco probable que esto ocurra, ya que estos fenómenos ocurren en varias decenas y/o centenas de años. Actualmente, las evidencias del campo indican estabilidad del área.

6.3.5 Geología Económica

No se ha observado la presencia de yacimientos de minerales metálicos, pero si de minerales no metálicos que detallamos:

- a) Yacimiento de yeso. El yeso existe en cantidades suficientes como para ser explotado como yacimiento; sin embargo, es necesario conocer las características de su pureza y calidad para ser utilizadas por la industria. El estrato de yeso alcanza hasta los 30 metros de espesor y aflora al SW en la parte alta, llega al flanco este del área de estudio y continúa hasta el cerro que está detrás del pueblo.
- b) Cantera de depósitos de grava y arena. Se ubica en el margen derecho del río Urubamba, denominado Cantera de Agregados de Yanahuara, actualmente están siendo explotados en dos frentes, separados por una vía carrozable; la Cantera 1 que está cerca al río tiene un espesor de 9.60 metros y el otro al que llamaremos Cantera 2 se encuentra hacia el noroeste del primero. La Cantera 2 es de mayor dimensión, su explotación se viene realizando en forma concéntrica, la altura total del banco es de 16,50 metros, de los cuales 4,50 metros son de cantos grandes y

pequeños, de formas angulosos con arena y limos que corresponde a un depósito de flujo de barro, y 12,00 metros de material fluvial compuesto de cantos rodados, arena y limo. Este material fluvial fue formado por el río Urubamba. En cuanto a reservas estimadas del material agregado para utilizar en diversas obras, y en el futuro relleno sanitario, según cálculos preliminares se proyecta obtener más de 132 000 m³ de gravas y arenas, el volumen de estas reservas son más que suficientes para abastecer los requerimientos de diversas obras civiles; asimismo, para mejorar el material de cobertura de plataformas y las demás construcciones sanitarias.

6.3.6 Hidrología e hidrogeología

La microcuenca Yuncacha Huayco hasta su confluencia con la cuenca del valle del río Vilcanota (Urubamba) tiene una longitud de 600 metros, y una extensión 22,28 hectáreas (0,2228 km²), con un patrón de drenaje del tipo dendrítico espaciado que recepciona las aguas pluviales que discurren superficialmente en épocas de lluvia, las mismas descargan sus aguas en las dos cárcavas principales; pero, si observamos los cauces principales no hay indicios de canales de avenidas recientes, lo que nos indica que parte de este caudal se infiltra en el subsuelo, el resto puede quedar almacenado en las diversas grietas de disolución, de lo contrario las precipitaciones de los últimos 20 a 30 años no han sido muy intensas. En el área específica no hay presencia de aguas superficiales por tratarse de una zona de secano. En la parte baja del área del proyecto, a más de 70 metros de distancia del límite inferior hay un canal con revestimiento de concreto de sección rectangular.

En el área específica del proyecto según las pruebas de geofísica no se ha detectado la existencia de aguas subterráneas; sin embargo, según los reportes del estudio geofísico en la segunda capa del SEV4 (paramétrico), hay aparente humedad a partir de los 1,80 metros hasta 17,80 metros, a partir de este nivel se encuentra el nivel estático de las aguas subterráneas correspondientes a la cuenca del río Urubamba. Tomando en consideración la cota más baja del área del relleno sanitario, la profundidad a la que se encuentra la napa acuifera sería a los 39.60 metros y a más de 80 metros de distancia, respecto al límite inferior de las plataformas proyectadas.

6.4 GEOTECNIA

En este acápite se presentan los trabajos realizados en campo y laboratorio, así como el análisis y

conclusiones, en base a los resultados del estudio de suelos, cuya finalidad es determinar las características físico-mecánicas del suelo de fundación requeridas para el diseño de las celdas unitarias y los componentes del Proyecto Relleno Sanitario Manual "Yuncacha Huayco"; asimismo, de las instalaciones administrativas.

6.4.1 Estructuras previstas

Las principales estructuras previstas para el Proyecto del Relleno Sanitario Manual son:

- Plataformas de pilas de residuos sólidos que son enterrados y sellados definitivamente, mediante celdas unitarias diarias.
- Áreas administrativas conformada por oficinas, servicios higiénicos, maestranza y vestuarios.
- Canales de captación de aguas pluviales.
- Canales de captación de lixiviados y su respectiva poza de almacenamiento.
- Vía de acceso interno para el transporte de los residuos sólidos al frente de trabajo. Tanto las vías de acceso así como los canales de captación de lixiviados se hará siguiendo las especificaciones técnicas para diseño de carreteras aprobados según RS 011-68. FO/DA.

6.4.2 Trabajos efectuados

Exploración de campo y ensayos de laboratorio. El reconocimiento geotécnico de campo ha consistido en el cartografiado y ubicación de 10 calicatas excavadas manualmente a cielo abierto, hasta una profundidad de 3,0 metros, estos fueron corroborados por 4 sondajes eléctricos verticales (SEV).

En el laboratorio se verificó la clasificación visual de todas las muestras representativas de los suelos típicos para efectuar con ellas los siguientes ensayos: Análisis granulométrico por tamizado, ensayo de Compactación Proctor Modificado, ensayo de relación de soporte de California, análisis químico por sulfatos y cloruros, ensayo de Permeabilidad con Carga Constante. Obtenidos los resultados de laboratorio se procedió a efectuar una comparación con las características de los suelos obtenidos en el campo, luego de las correlaciones respectivas en los casos necesarios, se obtuvieron los perfiles definitivos.

6.4.3 Características del subsuelo. La formación geológica de mayor interés para los pro-

pósitos del proyecto es el depósito cuaternario, conformado por depósitos aluviales. Los depósitos aluviales fueron transportados por flujos de barro y están constituidos por arena arcillosa (ML), arcilla inorgánica (CL) y grava arcillosa (GL). Los espesores de estos materiales en el área de estudio varían entre 0,50 a 31 metros, de sur a norte. Estos depósitos aluviales se encuentran emplazados sobre los depósitos fluviales del valle de Vilcanota conformado por grava arenosa con abundante bolonería.

La capa superior cubre casi todo el área del proyecto, su espesor es de 0,20 a 0,40 metros, debajo del primer horizonte descrito y hacia el sector oeste hay capas de arena limosa muy compacta y en espesores de 0,30 a 0,35 metros, inferior a ésta y en el mismo sector el suelo es arenoso (SM) muy suelto hasta la profundidad auscultada. En el sector este, el segundo horizonte está constituido por un suelo arenoso medianamente gradada (SW-SP) de grano medio grueso, más gravoso y con bolonería subangulosa. Los contenidos de cloruros y sulfatos según los análisis de laboratorio son despreciables. La permeabilidad de los estratos auscultados es de regular a impermeable que se corrobora con una prueba de laboratorio realizado en un horizonte más representativo del suelo es de $4,7 \times 10^{-6}$ de permeabilidad, ver ensayo de permeabilidad con carga constante Cuadro N.º 1.

6.4.4 Condiciones de cimentación. Teniendo en consideración los resultados del análisis y pruebas de laboratorio de las propiedades físico-mecánicas y químicas del suelo de fundación; así como la carga viva predominante, la geodinámica externa e interna, las características sísmicas del área y el tráfico de unidades recolectoras y de transporte que utilizarán el área del proyecto, se describe las características de cimentación para las estructuras de mayor concentración y profundidad previstas del proyecto, siendo estas básicamente: la base de las plataformas, la de cimentación del emplazamiento de las pozas de almacenamiento de lixiviados, el patio de maniobras y las áreas administrativas, las cimentaciones que corresponden a estas áreas son cimentaciones superficiales. Los suelos son de arena arcillosa (ML), arcilla inorgánica (CL) y grava arenosa (GC), véase Cuadro N.º 2.

a) Presión admisible y asentamientos. Se debe tomar en consideración las características físico-mecánicas y litológicas del suelo de fundación, tomando en cuenta principalmente las densidades se ha estimado una capacidad portante de 1,5 a 2,0 kg/cm², para el caso del suelo natural y

CUADRO N.º 1
CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL CUATERNARIO SEGÚN SU PERMEABILIDAD

PERMEABILIDAD	cm/seg	TIPO DE MATERIAL
Muy Buena	10	Grava, grava fina desprovista de material fino.
Buena	$10 - 10^{-4}$	Arenas puras, arenas y gravas con poco material fino.
Regular	$10^{-4} - 10^{-7}$	Arenas muy finas, limos, mezcla de arenas y arcillas.
Impermeable	$>10^{-7}$	Arcilla homogénea.

CUADRO N.º 2
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SUBSUELO DE FUNDACIÓN DEL RELLENO SANITARIO MANUAL DEL SANTUARIO DE MACHU PICCHU

Calicatas y tipo de Suelos (SUCS)	C - 1	C - 2	C - 3	C - 4	C - 5	C - 6	C - 7	C - 8	C - 9	C - 10
	GM-SM	GP	GM-ML	GC-CL	GC-CL	GP-SM		GC-CL	ML-CL	GC
Plasticidad	No tiene	No tiene	Baja	Baja	Baja	No tiene	Baja	Baja	Baja	Baja
Permeabilidad (cm/seg)	Regular	Buena	4.7×10^{-6}	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Impermeable	Regular
Densidad seca (gr/cm^3)	--	--	2.007	--	--	--	--	--	--	--
Contenido de humedad (%)	1.2	1.4	2.9	10.7	4.5	1.0	3.6	5.3	7.05	2.25
Límite líquido (%)	NP	NP	29-	23	22.5	26	22	31	29	23
Límite plástico (%)	NP	NP	19	14	13	NP	14	18	23	14
Índice plástico (%)	NP	NP	10	9	9.5	NP	8	13	6	9
Relación C.B.R al 95%	--	--	9.7	--	--	--	--	--	--	--
Estructura	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva	Masiva
Bolonería mayor (\emptyset cm.)	40	30 - 40	25	25	25	25	25	25	10-30	25 - 30

CUADRO N.º 3
RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMO-RESISTENTE

ESTRUCTURA PREDOMINANTE	TIPO DE SUELO	FACTOR SUELO	ACELERACIÓN TERRENO (g)	PERIODO DE VIBRACIÓN DE SUELOS (ts)
PLATAFORMA DEL RELLENO SANITARIO	I	1.0	0.2 g	0.3 seg

seco, al estado húmedo es 70% menos que el primer caso.

b) Análisis de la estabilidad de los taludes. Se subdividen en:

- Taludes sobre suelo de fundación (ML, CL, GC): El talud de excavación en el suelo predominante areno arcilloso-arcilla es de 1,15; este suelo es compacto y tiene buena estabilidad al estado seco; sin embargo, por el alto contenido de arcillas se vuelve muy plástico en épocas de lluvia, por lo que será necesario prevenirla. Los afloramientos rocosos se encuentran fracturados en una intensidad que fluctúa entre medio a fuerte.

Las características físicas son similares a lo largo de la ladera y quebradas donde afloran. Para fines prácticos de análisis se ha considerado como material homogéneo estable, por lo tanto el talud recomendable es de 1:1 a 1:2.

- Talud de excavación sobre depósitos inconsolidados: Los depósitos inconsolidados son arena fina arcillosa (SC) y arena limosa de grano muy fino (ML), de origen aluvial y residual; en este caso los taludes están formados por material inconsolidado heterogéneo y heterométrico son estables al estado seco y son inestables cuando están saturados de agua, por lo que es conveniente trabajar en bancos para darle una mayor estabilidad a la zona de corte. En el caso de estos taludes de corte constituidos por materiales no cohesivos a ligeramente cohesivo, tanto por observación como en forma analítica, la superficie potencial de deslizamiento será plana, correspondiéndole un mecanismo de falla traslacional. Dicho deslizamiento podrá originarse si independientemente de la altura del talud cuando es mayor que el ángulo de fricción interna del material (Terzagui y Peck). Teniendo en cuenta lo mencionado en el ítem anterior, en el presente caso recomendamos que los taludes de corte tengan pendiente no mayor de 28%. En los casos en que no se pueda cumplir con este requisito, deberán construirse muros de contención y banquetas siempre y cuando el talud supera los 3 metros de alto.

Dada las características del material de corte y la alta precipitación estacional es conveniente construir sistema de canales de captación de aguas pluviales con el objeto de evitar: el ingreso de las aguas pluviales al relleno, la erosión del talud de corte y la activación de la generación de lixiviados.

c) Recomendaciones para el diseño antisísmico. Considerando, que el área de estudios se encuentra dentro de la zona de alta sismicidad es necesario tener en cuenta el comportamiento de la estructura prevista en condiciones dinámicas.

Para el diseño sísmico-resistente se debe considerar los parámetros: factor de suelo, periodo predominante de vibración y tipo de suelo; de acuerdo a la información sísmológica del país dentro de un radio de 100 km respecto del área del proyecto es de esperarse que ocurran sismos de 8 u.u. de intensidad con un periodo de recurrencia de 50 años, la aceleración del terreno es de 0,2 g, para lo cual resumimos en el Cuadro N.º 3.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. CEPIS. *Propuesta de Normas Técnicas para la Ubicación, Diseño y Monitoreo de Residuos Sólidos*.
2. DIGESA (PIAS). *Análisis Sectorial de Residuos Sólidos del Perú*. Lima, 1998.
3. Jaramillo, Jorge. *Guía para el diseño, construcción y operación de Rellenos Sanitarios Manuales*. Washington, 1991.
4. INGEMMET. Carta Geológica Nacional. Cuadrángulo de Urubamba. Lima.
5. López Garrido J.; Pereira, M.; Rodríguez C. *Eliminación de Residuos Sólidos Urbanos*. Editores Técnicos Asociados. España, 1980.
6. Ruiz Albina R. *Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos en el Santuario Histórico de Machu Picchu*. Cusco, 1999.
7. Universidad Autónoma de México. Curso Internacional de Disposición Final de Residuos Sólidos. México, 1994.



Foto N.º 1. Se observa las siguientes geoformas: cerros escarpados (E), cárcava principal (V), conoide de depósito de flujos de barro (B), terraza fluvial 2 (T2), terraza fluvial 3 (T3).



Foto N.º 2. Se observan las dos cárcavas principales (V) que han erosionado los depósitos de flujo de barro (B).



Foto N.º 3. Observamos cárcavas profundas y asentamiento diferencial en la Formación Geológica Maras, conformado por yeso y horizontes de lutitas violáceas.



Foto N.º 4. Vista panorámica donde se observa los miembros Maras 1, 2 y 3; el aluvial (A) y el fluvial (F).

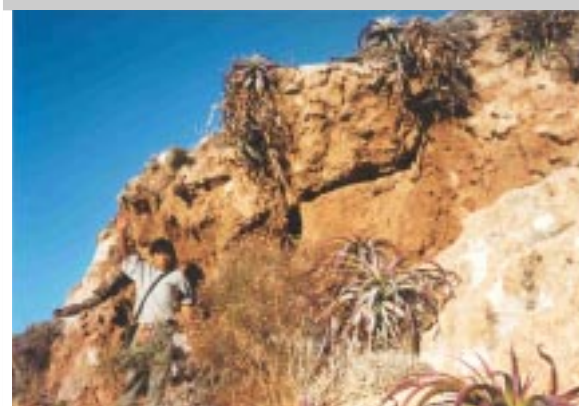


Foto N.º 5. Se observa el miembro Maras 1 conformado por potentes estratos de yeso con pequeños horizontes arcillosos.



Foto N.º 6.- Se observa el estado de la explotación de la Canteira 2 (Yanahuara) y los materiales de gravas y arenas.