

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
“ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN EN LAGUNAS DE SALMUERA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

CÉSAR AUGUSTO, TORRES PAITAN,

ASESOR

Ph.D. JORGE ELÍAS ALVA HURTADO

LIMA - PERÚ

2020

© 2020, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir el trabajo de suficiencia profesional en su totalidad o en partes, con fines estrictamente académicos.”

Torres Paitan, César Augusto

c.torres.paitan@gmail.com

989 474 104

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA SÍMBOLOS Y SIGLAS.....	9
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL SITIO	13
1.1 GENERALIDADES.....	13
1.1.1 Objetivo	13
1.1.2 Alcances de trabajo	13
1.1.3 Información existente.....	14
1.1.4 Ubicación del área de estudio.....	14
1.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	15
1.2.1 Precipitación y temperatura	15
1.2.2 Evaporación y evapotranspiración	16
1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO	17
CAPÍTULO II: INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS.....	19
2.1 CALICATAS DE EXPLORACIÓN.....	19
2.2 ENSAYOS DE CAMPO.....	21
2.2.1 Ensayo de densidad de campo.....	21
2.2.2 Ensayos de conductividad hidráulica in-situ.....	21
2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO	24
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES	26
3.1 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	26
3.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS.....	27
CAPÍTULO IV: MÉTODOS DE ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN.....	29
4.1 PROCESO DE INFILTRACIÓN.....	29

4.2	MODELO ANALÍTICO PARA EL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN.....	31
4.2.1	Modelo de Green-Ampt modificado por Mein y Larson	32
4.2.2	Conductividad hidráulica en la zona de transmisión.....	35
4.2.3	Potencial matricial en el frente de humedecimiento	38
4.3	MÉTODO NUMÉRICO DE ANÁLISIS INFILTRACIÓN.....	38
	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN	40
5.1	CONSIDERACIONES INICIALES	40
5.2	ANÁLISIS DE INFILTRACIONES.....	41
5.2.1	Método analítico Green- Ampt modificado por Mein y Larson (GAML).....	42
5.2.2	Modelamiento numérico	44
5.2.3	Análisis de resultados.....	56
	CONCLUSIONES.....	58
	RECOMENDACIONES.....	62
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	ANEXOS	

RESUMEN

La explotación de salmuera para el aprovechamiento del cloruro de potasio y otros derivados, generalmente se desarrollan en lagunas artificiales de extensas dimensiones y poca profundidad, contenidas por diques de tierra de poca altura a su alrededor. Parte importante en la elección del sitio para implementar estas lagunas de explotación es determinar si los suelos de fondo presentan condiciones geotécnicas e hidráulicas apropiadas para el posible almacenamiento de salmuera, bajo condiciones operativas de explotación, como, caudales de disposición, tiempos requeridos de llenado y procesos de recuperación del cloruro de potasio.

Este trabajo presenta la evaluación del sitio para seis lagunas artificiales de producción. Inicialmente se desarrolló la caracterización de los materiales de fondo de las lagunas a partir de exploraciones geotécnicas e hidráulicas con ensayos de campo y de laboratorio, que permitieron evaluar las condiciones del suelo, y estimar parámetros para la elaboración de los análisis de infiltración en el fondo de las lagunas. Los análisis de infiltración fueron desarrollados utilizando métodos: analítico y numérico. El método analítico de infiltraciones se desarrolló utilizando el método de Green-Ampt modificado por Mein y Larson, y los análisis de infiltraciones aplicando método numérico, utilizando el programa Hydrus 1D de PC-PROGRESS.

Los resultados obtenidos por los métodos analítico y numérico proporcionaron información relevante como, frentes de saturación en el perfil del suelo, tiempos para la primera formación de láminas de agua libre en la superficie, y tiempos de llenado hasta conseguir una altura de carga hidráulica necesaria para la operación.

La información obtenida por los métodos analítico y numérico fue contrastada y complementada entre ellos, permitiendo la realización de una valoración de las características geotécnicas e hidráulicas de los suelos de fondo de las seis lagunas artificiales de salmuera, y decidir los sitios adecuados para su implementación.

De los análisis se concluye que las unidades UP-2, UP-5, y UP-6 presentan aceptables condiciones para trabajar como lagunas artificiales de producción. Las unidades UP-1, UP-3, y UP-4 también podrían ser utilizadas con ciertas restricciones.

ABSTRACT

The extraction of brine for the exploitation of potassium chloride and other derivatives, generally develops in extensive and shallow artificial ponds, contained by low-level earth embankments. An important part in choosing the site to implement these extraction ponds is to determine if the foundation soils would have appropriate geotechnical and hydraulic conditions for the possible storage of brine, under operating conditions, such as disposal discharge, required filling times, and mineral recovery processes.

This work presents the site evaluation for six artificial production ponds. Initially, the characterization of the foundation materials of the ponds was developed from geotechnical and hydraulic explorations with field and laboratory tests, which allowed for the evaluation of their foundation conditions, and to estimate parameters for the development of infiltration analyses in their foundations. Infiltration analyses were developed using analytical and numerical methods. The infiltration analysis using the analytical method was developed using the Green-Ampt method modified by Mein and Larson, and the infiltration analysis through the numerical method was developed using the Hydrus 1D software from PC-PROGRESS.

The results obtained by the analytical and numerical methods provided relevant information such as saturation fronts in the soil profile, times for the first formation of sheets of free water on the surface, and filling times to achieve the necessary hydraulic load height for operation.

The information obtained by the analytical and numerical methods was contrasted and complemented among them, allowing the realization of an assessment of the geotechnical and hydraulic characteristics of the foundation soils of the six artificial brine lagoons, and deciding the appropriate sites for their implementation.

From the analysis, it is concluded that the UP-2, UP-5, and UP-6 units have suitable conditions to work as artificial production ponds. The UP-1, UP-3, and UP-4 units could also be used but with a few restrictions.

PRÓLOGO

El presente trabajo se desarrolló a partir del estudio realizado por la empresa Americas Potash Perú S.A., una empresa enfocada en la explotación de salmueras en el desierto de Sechura, Piura, para la producción de fertilizantes y sal doméstica como producto secundario.

La explotación de salmuera no es una actividad minera y no contamina el medio ambiente. Estas salmueras son extraídas del subsuelo y depositadas en lagunas artificiales, y utilizando la evaporación solar, son explotadas hasta obtener los productos minerales.

Parte de los trabajos previos, es evaluar las condiciones y características del lugar donde se proyectan estas lagunas artificiales. El presente trabajo se enfoca en evaluar el proceso de infiltración en los fondos de las lagunas, considerando las características de los suelos, formación, y propiedades geotécnicas e hidráulicas.

El autor participó de los estudios en campo, en la caracterización geotécnica e hidráulica del lugar, y en el desarrollo de dos análisis, el primero, un análisis numérico, utilizando el software de edición gratuita HYDRUS 1D de PC-PROGRESS, y el otro, elaborando una hoja de cálculo para realizar un análisis analítico, desarrollando el método de Green-Ampt modificado por Mein y Larson. Los resultados obtenidos por los dos métodos de análisis fueron comparados, de manera de evaluar que tan cercanas resultan estas aproximaciones. Finalmente, los resultados se complementaron, y se estimó información necesaria que sirvió en las decisiones para la elección de los lugares de implementación de las lagunas artificiales de explotación de salmuera.

Es valioso reconocer el aporte de estos tipos de trabajos que consideran comportamientos de flujos de agua en medio no saturados, y el desarrollo de modelos numéricos y analíticos, permitiendo realizar una valoración de las simplificaciones y singularidades para cada tipo de análisis.

El Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1.1	Unidades de producción	13
Tabla N° 1.2	Precipitación y temperatura medias - Estación Bernal	16
Tabla N° 1.3	Precipitación máxima diaria anual y eventos de tormenta de diseño	16
Tabla N° 1.4	Evapotranspiración mensual - Método de cálculo de Thornthawaite	17
Tabla N° 2.1	Resumen de calicatas ejecutadas	20
Tabla N° 2.2	Resumen de muestras extraídas	20
Tabla N° 2.3	Resumen de resultados de la densidad de campo	21
Tabla N° 2.4	Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica a carga variable	23
Tabla N° 2.5	Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica-agotamiento y recuperación	24
Tabla N° 2.6	Resumen de ensayos de laboratorio	24
Tabla N° 3.1	Conductividad hidráulica de las unidades de producción	27
Tabla N° 5.1	Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de producción	41
Tabla N° 5.2	Parámetros hidráulicos equivalente utilizados para cada unidad de producción	43
Tabla N° 5.3	Resumen de resultados de los cálculos por el método analítico de GAML	43
Tabla N° 5.4	Resumen de resultados de los cálculos por el método analítico de GAML	45
Tabla N° 5.5	Resumen de resultados de los cálculos por los métodos analíticos y numéricos.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	Ubicación de las unidades de producción	15
Figura N° 4.1	Perfil de humedecimiento	30
Figura N° 4.2	Distribución de la humedad a lo largo del perfil del suelo durante la infiltración	33
Figura N° 4.3	Curvas características para suelos con diferentes texturas	35
Figura N° 4.4	Relación entre la conductividad hidráulica y succión	36
Figura N° 4.5	Gráfico típico de curva característica basado en la ecuación de Van Genuchten (1980)	37
Figura N° 5.1	Mapa de isopiezas en el área de las lagunas	40
Figura N° 5.2	Carga hidráulica en la superficie en la UP-1 (Hydrus 1D)	46
Figura N° 5.3	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)	46
Figura N° 5.4	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)	47
Figura N° 5.5	Carga hidráulica en la superficie en la UP-2 (Hydrus 1D)	48
Figura N° 5.6	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-2 (Hydrus 1D)	48
Figura N° 5.7	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)	49
Figura N° 5.8	Carga hidráulica en la superficie en la UP-3 (Hydrus 1D)	49
Figura N° 5.9	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-3 (Hydrus 1D)	50
Figura N° 5.10	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-3 (Hydrus 1D)	50
Figura N° 5.11	Carga hidráulica en la superficie en la UP-4 (Hydrus 1D)	51
Figura N° 5.12	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-4 (Hydrus 1D)	52
Figura N° 5.13	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-4 (Hydrus 1D)	52
Figura N° 5.14	Carga hidráulica en la superficie en la UP-5 (Hydrus 1D)	53
Figura N° 5.15	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-5 (Hydrus 1D)	54
Figura N° 5.16	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-5 (Hydrus 1D)	54
Figura N° 5.17	Carga hidráulica en la superficie en la UP-6 (Hydrus 1D)	55
Figura N° 5.18	Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-6 (Hydrus 1D)	55
Figura N° 5.19	Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-6 (Hydrus 1D)	56

LISTA SÍMBOLOS Y SIGLAS

a	Parámetro de ajuste de la ecuación de Slack.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
b	Parámetro de ajuste de la ecuación de Slack.
C-	Calicata.
°C	Grados centígrados.
d	Número de días del mes (Método Thornthwaite)
d	Número de días del mes.
ETP	Evapotranspiración.
Ha	Hectárea.
H_i	Carga Hidráulica libre en la superficie.
H_0	Carga hidráulica inicial en la superficie.
H1	Profundidad alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento.
H2	Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidráulica libre en la superficie.
i	Tasa de infiltración.
I_p	Lámina infiltrada antes del empozamiento.
i_p	Precipitación o caudal de llenado.
I	Infiltración acumulada.
I	Índice de calor anual.
K	Conductividad hidráulica intrínseca del suelo.
K_s	Conductividad hidráulica saturada.
$K(\theta)$	Conductividad hidráulica no saturada en función a la humedad volumétrica.
$K(\theta_w)$	Conductividad hidráulica en la zona de transmisión.
$K_r(\theta_w)$	Conductividad hidráulica relativa de acuerdo con la ecuación de Burdine
m	metro.
m	Parámetro de ajuste de la ecuación de Van Genuchten (1980)
mm	milímetros de lluvia.
M-	Muestra.
n	Parámetro de ajuste de la ecuación de Van Genuchten (1980)
n (%)	Porosidad.
N	Número máximo de horas de solo según la latitud.
N.F.	Nivel freático.
N.T.P.	Norma Técnica Peruana.
q	Caudal de flujo.
q	Caudal de llenado por m^2
S (%)	Grado de saturación.
S_e	Grado de saturación efectiva.
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
t_p	Tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial
T	Temperatura media diaria.
T1	Tiempo transcurrido para formar la carga hidráulica de 30 cm.

UP	Unidad de producción.
W (%)	Humedad natural.
Z	Profundidad en el suelo.
α	Parámetro de ajuste de la ecuación de Van Genuchten (1980)
γ	Peso específico del suelo.
μ	Viscosidad del fluido
θ	Humedad volumétrica
θ_i	Humedad volumétrica inicial
θ_s	Humedad volumétrica saturada
θ_r	Humedad volumétrica residual
θ_w	Humedad volumétrica residual de la zona transmisión
ψ	Succión del suelo
ψ_T	Potencial de carga total
ψ_p	Potencial de carga de presión
ψ_g	Potencial de carga gravitacional
ψ_{os}	Potencial de carga osmótico
ψ_m	Potencial de carga matricial
ψ_f	Potencial matricial en el frente de humedecimiento
ψ_e	Presión matricial que corresponde a la presión de entrada de aire

INTRODUCCIÓN

La construcción de lagunas extensas de almacenamiento de salmuera para explotar el cloruro de potasio y otros derivados aprovechando el proceso natural de evaporación del agua, es comúnmente utilizada debido a que, por lo general, la cantidad de cloruro de potasio presente en la salmuera está alrededor del 1.0 al 2.0%. Esta poca cantidad de potasio presente en la salmuera requiere que la explotación presente un proceso muy económico, es así como generalmente la explotación se realiza utilizando lagunas artificiales no muy profundas, de grandes extensiones, suficientemente plana con fondos de baja permeabilidad, ubicadas en lugares con climas cálidos, que faciliten la evaporación, y en terrenos de escaso valor para actividades agrícolas y como centros poblados.

Estas lagunas, por lo general, necesitan de un suelo de fondo con condiciones de baja permeabilidad que imposibilitan infiltraciones significativas, para este fin, habitualmente se utiliza algún geosintético como una geomembrana, o algunas veces se utiliza una capa de suelo que le proporcione características poco permeables. La elección de la técnica de impermeabilización va a depender de factores como disponibilidad de materiales, características cualitativas de la salmuera y de un análisis costo-beneficio. En ese sentido, el análisis de las infiltraciones en los suelos de fondo de estas lagunas de explotación, y del proceso de sedimentación e impermeabilización, es la etapa básica de la evaluación inicial de cualquier proyecto relacionado a la construcción de estos depósitos de explotación.

El presente trabajo se divide en 5 capítulos, las cuales se describen a continuación:

Capítulo I:

Se presenta una descripción del sitio en donde se ubican las lagunas de explotación de salmuera, además de objetivos y alcances del estudio, e información climatológica como precipitación, temperatura y evapotranspiración.

Capítulo II:

Se describen los trabajos de investigaciones geotécnicas e hidráulicas de campo, así como los resultados de ensayos de laboratorio.

Capítulo III:

Se desarrolla una caracterización geotécnica e hidráulica del sitio en donde se proyectan las lagunas de explotación de salmuera denominadas unidades de producción.

Capítulo IV:

Se describe, teóricamente, los métodos de análisis de infiltración propuesta para desarrollar las evaluaciones de los sitios de las unidades de producción. En este capítulo se expone brevemente algunos conceptos de flujo en medios no saturados, así como el método analítico de Green-Ampt modificado por Mein y Larson.

Capítulo V:

Se desarrolla los análisis de infiltración por métodos: analítico y numérico para las seis unidades de producción.

Capítulo VI:

Se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los resultados.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL SITIO

1.1 GENERALIDADES

Americas Potash Perú S.A. es una empresa privada de firma canadiense dedicada al desarrollo de actividades mineras y explotación de recursos mineros, y tiene previsto la explotación de potasio proveniente de la salmuera que será inicialmente almacenada en seis unidades de producción que consisten en lagunas extensas de poca profundidad, permitiendo un proceso natural de evaporación y cristalización del potasio alcanzando de esta forma una explotación económica y de mayor beneficio.

La relación de las unidades de producción en estudio y sus áreas se muestran en la Tabla N° 1.1.

Tabla N° 1.1 Unidades de producción

Unidad de producción	Área (ha)
UP-1	2,048
UP-2	925
UP-3	1,325
UP-4	2,367
UP-5	2,180
UP-6	3,160

(Fuente: Elaboración propia)

1.1.1 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es evaluar y analizar el comportamiento del suelo de fondo de las lagunas de salmuera, en relación con las infiltraciones y la estimación de tiempos y caudales necesarios para la operación.

1.1.2 Alcances de trabajo

Los alcances del presente trabajo están relacionados en conseguir los objetivos previstos, para esto se consideró desarrollar las siguientes actividades:

- Revisión de información existente.
- Evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar.
- Ejecución de investigaciones geotécnicas.
- Pruebas geotécnicas e hidráulicas *in situ*.

- Obtención de parámetros hidráulicos del suelo.
- Análisis de los resultados de laboratorio y campo.
- Análisis de filtraciones por métodos analítico y numérico.
- Conclusiones y recomendaciones.

1.1.3 Información existente

Para elaborar el siguiente informe se revisaron los siguientes documentos:

- “Evaluación de filtraciones para lagunas de salmuera” preparado para Americas Potash S.A., elaborado por Jorge Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L, 2011.
- “Estudios de suelos zona C1 - Área 47.5 km² Cañamac - Sector Cañamac” preparado para SALSUD Salmueras Sudamericana, elaborado por Hydroenergía Consultores en Ingeniería S.R.L, 2012.
- “Estudio geológico y mecánica de suelos para determinar la resistencia e impermeabilidad en sectores de salmueras” preparado para Americas Potash S.A., elaborado por el Ing. Dante Llanos Caycho, 2009.
- “Diseño de ingeniería básica de la poza de evaporación - Fospac” elaborado por Golder Associates 2013.
- “Normas decadales de temperatura y precipitación y calendario de siembras y cosechas” - Ministerio de Agricultura y Riego Perú 2013.

1.1.4 Ubicación del área de estudio

El área en estudio se encuentra ubicada en el desierto costero de Sechura en el distrito y provincia de Sechura, al suroeste de la ciudad de Piura. En la Figura N° 1.1, y Plano PU-01 del Anexo VI, se presentan las ubicaciones de las unidades de producción consideradas en el proyecto.



Figura N° 1.1 Ubicación de las unidades de producción
(Fuente: Imagen Google Earth, Elaboración propia)

1.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS

El proyecto se encuentra ubicado en una zona subtropical, seca y árida, característica propia de zonas desérticas, donde la temperatura es templada en casi todo el año, notándose una diferencia de mayo a setiembre donde la temperatura mínima llega hasta los 18°C, y la máxima alcanza los 26°C, mientras que de octubre a abril la temperatura varía entre los 25° a 35°C. La humedad relativa se encuentra entre los valores de 70% y 82%, en tanto, la velocidad del viento varía entre 3.5 m/s y 4.9 m/s con un máximo extremo de 8.2 m/s.

1.2.1 Precipitación y temperatura

La información utilizada proviene de la estación Bernal ubicada en Sechura, con un registro de 20 años. Como parte del trabajo, se presentan las temperaturas y precipitaciones medias de cada mes, de acuerdo con los periodos registrados en la estación Bernal. No se ha considerado los registros durante el fenómeno del Niño. En Tabla N° 1.2 se muestra las precipitaciones y temperaturas medias, y en la Tabla N°1.3 la precipitación máxima diaria anual y eventos de tormenta de diseño.

Tabla N° 1.2 Precipitación y temperatura medias - Estación Bernal

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	12.4	15.4	11.0	6.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.3
Temperatura (°C)	27.5	27.9	27.6	26.0	24.4	22.4	22.0	21.4	21.6	21.8	23.2	25.4

(Fuente: (6): Golder Associates, 2013)

Tabla N° 1.3 Precipitación máxima diaria anual y eventos de tormenta de diseño

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima diaria anual (mm) 24-horas	Eventos de tormenta de diseño (mm) 24-horas
2	10	11
5	30	34
10	54	61
20	88	100
25	102	115
50	154	174
100	225	254

(Fuente: (6): Golder Associates, 2013)

Se puede observar de la Tabla N° 1.2 que las precipitaciones medias mensuales son escasas en esta zona en casi todo el año, por lo que no serán tomadas en cuenta en los análisis de infiltración del agua en el suelo, así mismo, de la Tabla N° 1.3 se puede observar que las precipitaciones de eventos de tormenta de diseño, para un periodo de retorno de 20 años, periodo estimado de operación de las lagunas de salmuera, resultan 100 mm en un tiempo de 24 horas. Estas alturas de precipitaciones de tormenta deberían de ser consideradas en los cálculos del borde libre de los pequeños diques de contención en la etapa de diseño.

1.2.2 Evaporación y evapotranspiración

De acuerdo con el Atlas de evaporación en el Perú (SENAMHI, 1994), La evaporación mensual media varía entre 210 y 129 mm, y con un promedio de evaporación anual de 2300mm.

Se realizó la estimación de la evapotranspiración potencial, a pesar de no existir vegetación considerable, utilizando el método de Thornthwaite a partir de datos de temperatura media mensual y las horas de sol de acuerdo con la latitud.

La formulación propuesta se presenta en la Ecuación 1-1.

$$ETP = \frac{N}{12} \frac{d}{30} \varepsilon \quad 1-1$$

En la Ecuación 1-1, N es el número máximo de horas de sol según la latitud, d es el número de días del mes, ε la ETP diaria en mm $\varepsilon = 16 \left(10 \frac{t}{I} \right)^a$, donde

$a = 675.10^{-9} I^3 - 771.10^{-7} I^2 + 1972.10^{-5} + 0.49239$, donde i es el índice de calor mensual: $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$ siendo t la temperatura media diaria en grados centígrados,

°C, el cálculo del índice de calor anual: $I = \sum i$.

En la Tabla N° 1.4 se muestra los resultados de los cálculos de evapotranspiración de acuerdo con el método Thornthwaite.

Tabla N° 1.4 Evapotranspiración mensual - Método de cálculo de Thornthwaite

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Temp. (°C)	27.5	27.9	27.6	26.0	24.4	22.4	22.0	21.4	21.6	21.8	23.2	25.4
Evap mm	181.5	185.4	173.1	159.0	136.1	119.6	116.8	101.6	115.8	115.1	135.2	153.9

(Fuente: Elaboración propia)

Los valores de evapotranspiración mensual, calculados y presentados en la Tabla N° 1.4, muestran que durante los meses más calurosos la columna de agua evaporada sería del orden de 170 mm a 190 mm.

El déficit mensual de evaporación deberán de ser regulado durante la operación. No será utilizado como condición en los análisis de infiltración.

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio donde se proyecta la construcción de las unidades de producción se encuentra ubicada morfológicamente en el desierto de Sechura relacionados con la Región Para-andina, con este nombre se reconoce a la llanura

baja del desierto costero, comprendido entre la Cordillera de la Costa y la parte baja de la Cordillera Occidental. Una porción de esta unidad aparece en el sector Sureste del área estudiada, dicho relieve se desarrolló primero por el relleno sedimentario de las cuencas Lancones y Sechura, en el Mesozoico y Cenozoico, respectivamente, y posteriormente por la formación de llanuras de inundación en el Pleistoceno; la acumulación eólica en el reciente modificó dicho relieve de tal forma que en su sector oriental ha adoptado un paisaje típico de "tierras malas" por efecto de un drenaje dendrítico que corta a los mantos de arena.

Localmente el terreno presenta relieves relativamente planos y zonas onduladas con una ligera pendiente y suelos formados por arenas gruesas y restos de conchas pequeñas combinadas con yeso y minerales de nitrógeno que se erosionan fácilmente en climas húmedos.

CAPÍTULO II: INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

Los trabajos se iniciaron con un reconocimiento del lugar identificando las unidades de producción, de tal forma de ubicar los puntos de investigación más representativos de cada unidad. Se realizaron pruebas e investigaciones *in situ* para la caracterización geotécnica de los suelos. Los trabajos de investigación de campo consistieron en la ejecución de calicatas de exploración a cielo abierto, extrayéndose muestras disturbadas e inalteradas de los estratos más representativos para su posterior análisis en el laboratorio, así mismo, se realizaron ensayos *in situ* de densidad y de conductividad hidráulica.

Estos trabajos de exploración e investigación estuvieron orientados a determinar las características físicas y mecánicas del subsuelo donde se localizarían las unidades de producción. La ubicación de las calicatas ejecutadas se presenta en el Plano PU-01 del Anexo VI.

A continuación, se detallan los trabajos que se realizaron en la etapa de la investigación de campo.

2.1 CALICATAS DE EXPLORACIÓN

Considerando que el objetivo de este estudio era evaluar las alternativas de lagunas a ser seleccionadas, se realizaron en total siete calicatas de exploración a cielo abierto, ejecutándose una para cada unidad de producción: UP-1, UP-2, UP-3, UP-4 y UP-6, y dos, para la unidad de producción UP-5. Las calicatas alcanzaron diversas profundidades y fueron llamadas desde C-1 hasta C-7. En estudios posteriores deberán realizarse un mayor número de investigaciones de campo.

Inicialmente se realizó una descripción visual de los suelos encontrados en las calicatas, de donde se obtuvieron 20 muestras representativas, entre disturbadas e inalteradas, para su posterior análisis en el laboratorio, y determinar propiedades físicas y mecánicas, y parámetros geotécnicos.

En la Tabla N° 2.1 se muestra el resumen de las calicatas ejecutadas, indicando la unidad de producción donde se realizó, las coordenadas y la profundidad alcanzada en cada una de ellas.

Tabla N° 2.1 Resumen de calicatas ejecutadas

Calicata	Unidad de producción	Coordenadas		Profundidad (m)
		Este	Norte	
C-1	UP-4	544284	9378551	4.00
C-2	UP-5	536068	9376100	1.50
C-3	UP-5	535845	9375720	2.80
C-4	UP-6	538382	9369286	2.80
C-5	UP-1	530873	9366417	3.40
C-6	UP-2	532939	9374255	3.40
C-7	UP-3	531279	9377414	3.80

(Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla N° 2.2 se muestra el resumen de las muestras extraídas. Los registros de cada calicata se presentan en el Anexo I.

Tabla N° 2.2 Resumen de muestras extraídas

Calicata	Unidad de producción	Muestra	Profundidad (m)
C-1	UP-4	M-1	0.20 - 0.70
		M-2	0.70 - 1.40
		M-3	1.40 - 4.00
C-3	UP-5	M-1	0.80 - 1.40
		M-2	2.50 - 2.80
C-4	UP-6	M-1	0.10 - 0.40
		M-2	0.40 - 1.20
		M-3	1.80 - 2.80
C-5	UP-1	M-1	0.00 - 0.30
		M-2	0.30 - 1.25
		M-3	1.25 - 3.40
C-6	UP-2	M-1	0.00 - 0.60
		M-2	0.60 - 2.10
		M-3	2.10 - 3.00
		M-4	3.00 - 3.40
C-7	UP-3	M-1	0.10 - 0.50
		M-2	0.50 - 1.70
		M-3	1.70 - 2.00
		M-4	2.00 - 3.15
		M-5	3.15 - 3.80

(Fuente: Elaboración propia)

2.2 ENSAYOS DE CAMPO

Se realizaron ensayos de campo para determinar propiedades y parámetros geotécnicos e hidráulicos de los suelos encontrados. Se describe a continuación los ensayos realizados *in situ*.

2.2.1 Ensayo de densidad de campo

Este ensayo permite determinar la densidad del suelo *in situ* por el método del cono de arena de acuerdo con el ASTM D 1556-82. Se efectuaron 12 ensayos de densidad utilizando el cono de arena de 6" durante los trabajos de campo. En la Tabla N° 2.3 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla N° 2.3 Resumen de resultados de la densidad de campo

Calicata	Profundidad (m)	Densidad húmeda (g/cm ³)	Densidad seca (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)
C-1	0.30	1.17	1.05	11.93
	1.20	1.83	1.54	18.33
	2.00	1.84	1.36	35.79
C-3	0.80	1.69	1.29	30.67
C-4	0.10	1.14	1.12	1.65
	0.40	1.16	1.06	9.16
C-5	0.05	1.51	1.38	9.16
	0.90	1.92	1.70	13.05
C-6	0.05	1.45	1.43	1.52
	1.00	1.72	1.57	9.53
C-7	0.20	1.49	1.45	2.25
	1.10	1.68	1.55	8.73

(Fuente: Elaboración propia)

2.2.2 Ensayos de conductividad hidráulica in-situ

Se realizaron ensayos de conductividad hidráulica *in situ* empleando metodologías y formulaciones generalmente utilizadas en trabajos geotécnicos. Como primer método usado fue la recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, que sugiere un ensayo sencillo para estimar la conductividad hidráulica del suelo, y el segundo método utilizado es siguiendo las formulaciones establecidas por agotamiento y recuperación del nivel freático, de acuerdo con Luthin (1966).

La conductividad hidráulica no solamente se relaciona con la distribución, tamaño

de los granos, interconexión de los vacíos y la humedad del suelo, sino también con la viscosidad y densidad del fluido, que dependen de la temperatura, presión, concentración de sales, etc. Experimentalmente se conoce que para un suelo poroso rígido la relación de la conductividad hidráulica es: $K_s = k \frac{\gamma}{\mu}$, donde K_s es la conductividad hidráulica saturada, k es la permeabilidad intrínseca, γ es el peso específico del fluido, y μ es la viscosidad del fluido.

La salmuera presenta valores de peso específico igual a 10,250 N/m³, y viscosidad a una temperatura de 26°C igual a 0.967E-06 m²/s, en tanto el agua dulce un peso específico igual a 10,000 N/m³, y viscosidad a una temperatura de 26°C igual a 0.870E-06 m²/s.

De la relación de conductividad hidráulica, se verifica que es directamente proporcional al cociente $\frac{\gamma}{\mu}$, y este cociente entre la salmuera y agua dulce se presenta en el orden de 1.08, que podrían indicar que no se presentaría mayores variaciones en los valores determinados de conductividades hidráulicas usando agua dulce o salmuera. Sin embargo, este modelo de predicción de permeabilidad no tiene en cuenta los efectos de interacción fluido-partícula. En suelos granulares estas interacciones resultan despreciables, en tanto para suelos arcillosos con alta superficie específica ocurre lo contrario ya que el efecto de las fuerzas eléctricas de superficie prevalece respecto de las máxicas (Montoro y Francisca, 2010). Es decir que en muestras de suelos que contienen arcillas, los valores de la permeabilidad podrían cambiar afectado por la calidad de agua intersticial. En muestras con poca arcilla puede en principio, emplearse cualquier fluido para medir la permeabilidad intrínseca, bastando introducir el valor conveniente de peso específico γ y viscosidad μ para obtener la conductividad hidráulica (Custodio y Llamas, 2001).

Durante las exploraciones de campo en las unidades de producción se identificaron suelos arenosos y limosos en el primer metro de suelo, y para efectos prácticos se puede asumir que la relación $\frac{\gamma}{\mu}$, de la salmuera y agua dulce no presentarían mayores diferencias, de manera que los resultados obtenidos de las conductividades hidráulicas *in situ* para la escala de modelamiento y alcances

previstos resultan aceptables.

Prueba hidráulica a carga variable

Estas pruebas de conductividad fueron realizadas en los hoyos utilizados para determinar la densidad de campo por el método de cono de arena. El método consiste en añadir agua y esperar que el consumo se presente uniforme, asumiendo que en ese momento la porción de suelo en ensayo está cercano a su estado saturado. Se procede a medir los desniveles de la lámina de agua y registrar los tiempos. Las memorias de cálculo se presentan en el Anexo II. En la Tabla N°2.4 se presenta el resumen de las pruebas realizadas.

Tabla N° 2.4 Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica a carga variable

Calicata	Unidad de producción	Profundidad (m)	Conductividad hidráulica (cm/s)
C-1	UP-4	0.30	1.63 E-02
		1.20	7.91 E-04
		2.00	2.83 E-05
C-3	UP-5	0.20	2.85 E-02
		0.80	4.10 E-03
C-4	UP-6	0.40	7.30 E-00
C-5	UP-1	0.05	1.43 E-02
		0.90	9.11 E-03
C-6	UP-2	0.10	2.09 E-02
		1.00	4.23 E-03
C-7	UP-3	0.20	3.43 E-02
		1.10	2.41 E-03

(Fuente: Elaboración propia)

Prueba hidráulica de agotamiento y recuperación

Esta prueba de agotamiento y recuperación permitió obtener la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa. Las pruebas fueron realizadas en las calicatas y se intentó en lo posible, que presenten una forma circular en la superficie, además de profundizarlo una vez alcanzado el nivel freático. Esta prueba consistió en extraer el agua dentro de la calicata y posteriormente ir midiendo los niveles de recuperación para cada lapso. Las memorias de cálculo se presentan en el Anexo II. En la Tabla N° 2.5 se presenta un resumen de las pruebas realizadas.

Tabla N° 2.5 Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica- agotamiento y recuperación

Calicata	Unidad de producción	Profundidad (m)	Conductividad hidráulica (cm/s)
C-3	UP-5	1.40 - 2.30	5.53 E-03
C-4	UP-6	1.20 - 2.40	2.53 E-03
C-5	UP-1	1.25 - 2.00	6.80 E-03
C-5	UP-1	1.25 - 1.80	1.43 E-02
C-6	UP-2	2.45 - 3.30	1.19 E-04

(Fuente: Elaboración propia)

2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Durante las investigaciones geotécnicas se seleccionaron 20 muestras alteradas e inalteradas de las 7 calicatas ejecutadas para su estudio en laboratorio. Se realizaron ensayos de clasificación SUCS, gravedad específica, peso volumétrico y ensayos de conductividad hidráulica de pared flexible, de acuerdo con las siguientes normas citadas a continuación:

- Análisis granulométrico por tamizado, NTP 339.128 / ASTM D422.
- Limite líquido y limite plástico, NTP 339.129 / ASTM D4318.
- Contenido de humedad, NTP 339.127 / ASTM D2216.
- Gravedad específica, ASTM D854 / C-127/ C-128.
- Peso volumétrico, ASTM C29 / C29M-97.
- Conductividad hidráulica de pared flexible, ASTM D5084

Se presenta en la Tabla N° 2.6 un resumen de los resultados de los ensayos realizados en laboratorio.

Tabla N° 2.6 Resumen de ensayos de laboratorio

Calicata	UP	Muestra	Prof. (m)	SUCS	Densidad húmeda / densidad seca (g/cm ³)	Gravedad específica de los sólidos	Conductividad hidráulica pared flexible (cm/s)
C-1	UP-4	M-1	0.20 - 0.70	ML	1.17 / 1.05 (*)	2.49	
		M-2	0.70 - 1.40	ML	1.83 / 1.54 (*)	2.46	
		M-3	1.40 - 4.00	CH	1.84 / 1.36 (*)	2.41	3.52 E-08
C-3	UP-5	M-1	0.80 - 1.40	ML	1.47 / 1.12	2.31	
	UP-5	M-2	2.50 - 2.80	SP-SM		2.56	
C-4	UP-6	M-1	0.10 - 0.40	SP-SM	1.14 / 1.12 (*)	2.74	
	UP-6	M-2	0.40 - 1.20	SW-SM	1.16 / 1.06 (*)	2.41	
	UP-6	M-3	1.80 - 2.80	SM		2.37	
C-5	UP-1	M-1	0.00 - 0.30	ML	1.51 / 1.38 (*)	2.37	
	UP-1	M-2	0.30 - 1.25	SM	1.92 / 1.70 (*)	2.31	

Calicata	UP	Muestra	Prof. (m)	SUCS	Densidad húmeda / densidad seca (g/cm ³)	Gravedad específica de los sólidos	Conductividad hidráulica pared flexible (cm/s)
C-6	UP-1	M-3	1.25 - 3.40	SM		2.40	
	UP-2	M-1	0.00 - 0.60	SM	1.45 / 1.43 (*)	2.31	
	UP-2	M-2	0.60 - 2.10	SM	1.72 / 1.57 (*)	2.45	
	UP-2	M-3	2.10 - 3.00	SM	2.01 / 1.77	2.49	
	UP-2	M-4	3.00 - 3.40	SM		2.36	
C-7	UP-3	M-1	0.10 - 0.50	SM	1.49 / 1.45 (*)	2.35	
	UP-3	M-2	0.50 - 1.70	ML	1.68 / 1.55 (*)	2.59	
	UP-3	M-3	1.70 - 2.00	MH	1.52 / 1.23	2.30	
	UP-3	M-4	2.00 - 3.15	MH	1.53 / 1.22	2.33	
	UP-3	M-5	3.15 - 3.80	MH	1.46 / 0.88	2.14	3.36 E-07

(Fuente: Elaboración propia)

Nota: SP-SM: Arena pobremente gradada limosa

SW-SM: Arena bien gradada limosa

SM: Arena limosa

ML: Limo de baja plasticidad

MH: Limo de alta plasticidad

CH: Arcilla de baja plasticidad

(*) Valores obtenidos de la prueba de densidad por el método del cono de arena en campo

En el Anexo III se presenta los certificados de laboratorio.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES

Las características geotécnicas de los suelos encontrados en las unidades de producción fueron descritas a partir de un reconocimiento visual, de las exploraciones geotécnicas, de los resultados de laboratorio y de la información revisada.

Esta descripción está orientada para los análisis de infiltración y a la evaluación de las condiciones del sitio para ser usado como lagunas de salmuera.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Unidad de producción UP-1

En esta unidad se encuentra superficialmente un suelo que corresponde a un limo de baja a nula plasticidad con arena fina a media, de compacidad blanda y ligeramente húmeda, este estrato alcanza una profundidad aproximada de 0.30 m, seguidamente se aprecian estratos de arena media a gruesa limosa con finos de baja plasticidad, medianamente densa, estos estratos se encuentran aproximadamente entre las profundidades 0.30 m - 3.40 m. El nivel freático se registra a la profundidad de 1.25 m.

Unidad de producción UP-2

En esta unidad se distinguen estratos de suelos formados por arenas limosas de similares características, de sueltas a medianamente densas, desde la superficie hasta la profundidad de exploración de 3.40 m. La profundidad del nivel freático se registra a los 2.45 m.

Unidad de producción UP-3

En esta unidad se encuentra superficialmente un suelo que corresponde a una arena limosa suelta, este estrato alcanza una profundidad aproximada de 0.50 m. A partir de los 0.50 m de profundidad, aparecen limos de baja a alta plasticidad hasta la profundidad de exploración de 4.00 m. No se registra nivel freático hasta la profundidad de exploración.

Unidad de producción UP-4

En esta unidad se encuentra un primer estrato de limo de baja plasticidad medianamente compacto hasta la profundidad de 1.40 m, a continuación, se presenta un estrato de arcilla de alta plasticidad y compacta hasta la profundidad de exploración que fue de 4.00 m. No se registra nivel freático hasta la profundidad de exploración.

Unidad de producción UP-5

En esta unidad se encuentra un primer estrato de arena limosa hasta la profundidad de 0.80 m, a continuación, aparece un estrato de limo de baja plasticidad hasta la profundidad de 1.40 m, seguidamente una arena limosa hasta la profundidad de 2.80 m. El nivel freático encontrado se registra a la profundidad de 1.40 m.

Unidad de producción UP-6

En esta unidad se encuentran estratos de arena bien gradada limosa suelta a densa hasta la profundidad de exploración que fue de 2.80 m. El nivel freático se registra a la profundidad de 1.20 m.

3.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS

De acuerdo con los resultados de los trabajos de campo y de laboratorio, y a partir de las condiciones hidráulicas de los suelos, se pueden establecer los siguientes perfiles para cada unidad de producción y que se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla N° 3.1 Conductividad hidráulica de las unidades de producción

Unidad de Producción	Profundidad napa freática (m)	Profundidad (m)	SUCS	Conductividad hidráulica m/día
UP-1	1.25	0.00 - 0.30	ML	12.30
		0.30 - 3.40	SM	5.87
UP-2	2.45	0.00 - 2.45	SM	3.60
		2.45 - 3.40	SM	0.10
UP-3	N.E.	0.00 - 0.50	SM	29.4
		0.50 - 4.00	MH	2.85 E-04
UP-4	N.E.	0.00 - 1.40	ML	14.08
		1.40 - 4.00	CH	3.03 E-05

Unidad de Producción	Profundidad napa freática (m)	Profundidad (m)	SUCS	Conductividad hidráulica m/día
UP-5	1.40	0.00 - 0.80	SM	24.6
		0.80 - 1.40	ML	3.46
		1.40 - 2.50	SM	2.18
UP-6	1.20	0.00 - 2.80	SM	2.18

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO IV: MÉTODOS DE ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN

Los análisis de infiltración en los suelos de fondo de las lagunas de salmuera fueron planteados considerando evaluarlas en una sola dimensión, y en la dirección vertical, de acuerdo con el sentido del flujo, y conforme a la escala del modelo propuesto, que consiste en una carga hidráulica de operación de solamente 0.30 m, y dimensiones aproximadas de una laguna rectangular de 500 m y 2000 m, por cada lado.

La caracterización de los suelos, y determinación de parámetros geotécnicos e hidráulicos, en cada unidad de producción, fueron determinadas a partir de una sola calicata. Posterior a esta primera evaluación, y de acuerdo con los resultados, se complementarán los estudios con mayores investigaciones en las unidades que resulten factibles de ser usadas como lagunas de producción.

La precipitación y evapotranspiración no serán consideradas en los análisis de infiltración. Las precipitaciones medias mensual en la zona son escasas durante todo el año. La evapotranspiración calculada presenta valores mensuales entre los 170 mm a 190 mm. Estos valores de pérdida en columnas de carga de agua en las lagunas, por ser mensuales, deberán ser controladas en la operación, y no consideradas en los análisis de infiltración que se presentaría en periodos de horas o minutos.

Los análisis de infiltración se desarrollaron por dos métodos, un método analítico, y un método numérico usando el software comercial Hydrus 1D de PC-PROGRESS.

4.1 PROCESO DE INFILTRACIÓN

Cuando el agua va infiltrando en el suelo, debido a una diferencia de cargas hidráulicas, los estratos superiores van humedeciéndose y alterando el contenido de agua, tendiendo a saturarlo. En la Figura N° 4.1 se puede observar una distribución típica de agua, en un perfil de suelo uniforme sometido a una pequeña carga hidráulica H_0 en la superficie. En este perfil se puede verificar cuatro zonas: de saturación, transición, de transmisión y de humedecimiento.

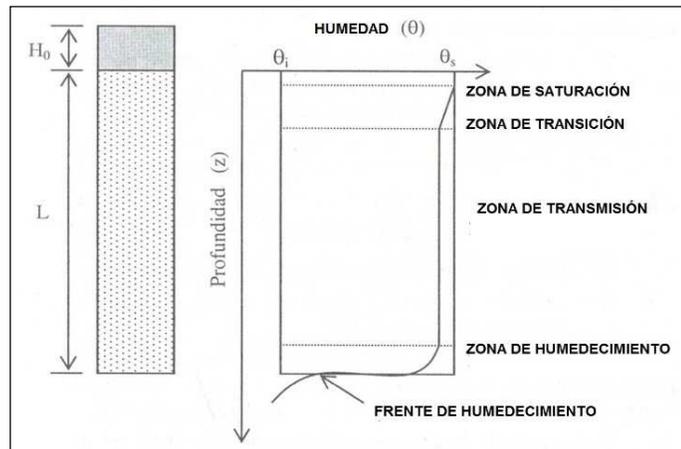


Figura N° 4.1 Perfil de humedecimiento
(Fuente: (4): Brandão, V.; Cecílio, R.; Pruski, F. & Da Silva, D., 2010)

En la Figura N° 4.1, θ_i es la humedad volumétrica inicial del suelo, θ_s es la humedad volumétrica de saturación de suelo, H_0 es la carga hidráulica en la superficie.

Si la humedad inicial del suelo fuera conocida, la infiltración acumulada I , que es el volumen de agua infiltrada en el suelo por una unidad de área, sería:

$$I = \int_0^z (\theta - \theta_i) dz \quad 4-1$$

En la Ecuación 4-1 z es la distancia en la dirección del flujo, θ es la humedad volumétrica a lo largo de la profundidad z , y θ_i es la humedad volumétrica presente en el perfil de suelo antes del inicio de la infiltración.

El movimiento del agua en un suelo no saturado puede ser descrito por la ecuación de Darcy, y puede ser expresada de la siguiente manera:

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \psi_t}{\partial Z} \quad 4-2$$

En la Ecuación 4-2 q es el flujo, $k(\theta)$ es la conductividad hidráulica para el medio no saturado que depende de la humedad volumétrica, ψ_t es el potencial total en

el suelo, y $\frac{\partial \psi_t}{\partial Z}$ es el gradiente hidráulico.

El potencial total del agua en el suelo viene dado por: $\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$, donde ψ_p es el potencial de presión que surge cuando la presión que actúa sobre el agua en el suelo es mayor que la atmosférica, ψ_g es el potencial gravitacional e igual a la medida de la profundidad, ψ_{os} es el potencial osmótico que se relaciona cuando el agua en el suelo forma alguna solución de sales y/o de otros solutos, y ψ_m es el potencial matricial que está asociado a la interacción entre la matriz sólida del suelo y agua. Mayores alcances pueden ser revisados en Reichardt & Timm (2012)

La tasa de infiltración (i) es definida como la lámina de agua (volumen por unidad de área) que atraviesa una superficie de suelo en una unidad de tiempo, por lo tanto, la tasa de variación de la infiltración acumulada en un determinado tiempo puede ser definido por:

$i = \frac{dI}{dt}$, donde i es la tasa de infiltración, I es la infiltración acumulada, y t es el tiempo.

4.2 MODELO ANALÍTICO PARA EL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN

Existen modelos analíticos teóricos y empíricos para realizar análisis de infiltración, en donde los empíricos tienen la ventaja de relacionar parámetros del modelo a las características del suelo, sin que necesariamente tengan un significado físico, y como desventaja es que estos modelos por lo general son adecuados solamente para las condiciones y suelos para los que fueron estudiados. Los modelos teóricos son basados en la ecuación de Darcy o en la ecuación de Richard`s, que fue desarrollada a partir de la ecuación de Darcy.

Para el desarrollo de los análisis en el presente trabajo, se utilizó el modelo de Green-Ampt desarrollado en 1911 para estimar la infiltración en suelos homogéneos y sometidos a una carga hidráulica constante, vale decir una carga de agua empozada. Este modelo muestra la infiltración en función a la conductividad hidráulica del suelo saturado, del potencial de carga matricial del

suelo antes de la infiltración y de las humedades inicial y de saturación.

El modelo Green-Ampt, sin embargo, no se puede aplicar cuando no se cuenta con una carga hidráulica inicial de agua empozada en la superficie, es decir, no se puede aplicar directamente en una situación de precipitación o de llenado a un caudal constante. Mein y Larson (1973) realizaron una modificación al modelo inicial de Green-Ampt que permite aplicar este modelo a las condiciones típicas de infiltración durante la ocurrencia de precipitación o de llenado a un caudal constante.

4.2.1 Modelo de Green-Ampt modificado por Mein y Larson

El modelo de Green-Ampt está basado en la ecuación de Darcy y presenta las siguientes condiciones para su aplicación:

- Existencia de una carga hidráulica constante en la superficie.
- Un perfil de suelo homogéneo y de profundidad infinita.
- La existencia de un frente de humedecimiento abrupto.
- El potencial de agua en el suelo y en el frente de humedecimiento, constante en el tiempo y a lo largo de la profundidad considerada.
- Perfil de humedad de suelo saturado desde la superficie hasta la profundidad del frente de humedecimiento, abajo de esta profundidad el suelo se considera con la humedad y potencial matricial constante iguales a las condiciones anteriores al inicio de la infiltración.

En la Figura N° 4.2 se muestra la distribución de la humedad del suelo a lo largo del perfil del suelo.

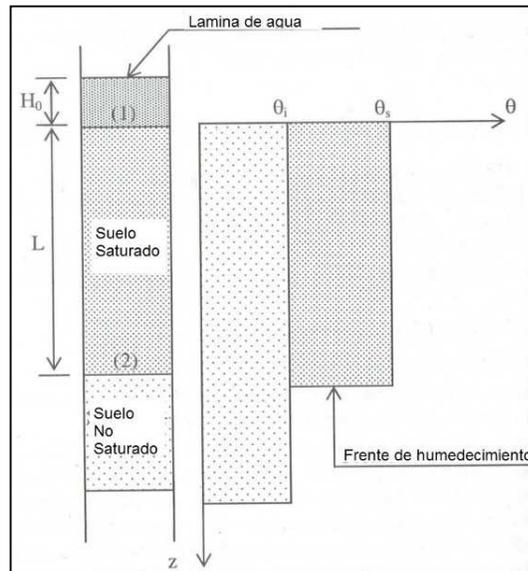


Figura N° 4.2 Distribución de la humedad a lo largo del perfil del suelo durante la infiltración
(Fuente: (4): Brandão, V.; Cecílio, R.; Pruski, F. & Da Silva, D., 2010)

La ecuación de Green Ampt presenta las siguientes condiciones iniciales y de contorno

Para $t > 0$ y $z = 0$, $\theta_i = \theta_s$

Para $t \geq 0$ y $z = -\infty$, $\theta = \theta_i$

Para $t \geq 0$ y $z = 0$, $\phi_p = H_0$

El caudal unitario obtenido con la ecuación de Darcy entre los puntos 1 y 2 de la

Figura N° 4.2 tiene la forma igual a $q = -K_s \frac{-L + \psi_f - H_0}{L}$, este caudal unitario

al igualarlo con la tasa de infiltración obtenemos $i = \frac{dI}{dt} = K_s \frac{L - \psi_f + H_0}{L}$.

En esta relación última, la carga hidráulica H_0 podrá optarse $\cong 0$ cuando la suma de carga gravitacional y matricial sea mucho mayor a H_0 , además como la carga matricial ψ_f es negativa podemos obtener la siguiente ecuación:

$$i = K_s \frac{L + \psi_f}{L} = K_s \left(1 + \frac{\psi_f}{L} \right) \quad 4-3$$

Podemos observar que la tasa de infiltración inicial será alta hasta decrecer en el

tiempo conforme el frente de humedecimiento alcance mayor profundidad.

La infiltración acumulada es $I = L(\theta_s - \theta_i)$ y reemplazando en la Ecuación 4-3 se obtiene la siguiente ecuación:

$$i = K_s \left(1 + \psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{L} \right) \quad 4-4$$

La infiltración acumulada en función al tiempo puede ser calculada por

$$I(t) = \int_0^t i(t) dt, \text{ entonces reemplazando e integrando la Ecuación 4-4 obtenemos}$$

la Ecuación 4-5 para determinar la lámina de agua acumulada en función al tiempo, sabiendo que $I(t) = 0$ para $t=0$

$$K_s t = I(t) - \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left(1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right) \quad 4-5$$

Sin embargo, el modelo propuesto de Green-Ampt (1911) considera la existencia de una lámina de agua en la superficie. Mein y Larson (1973) realizaron una modificación al modelo de Green-Ampt para poder adecuar esta ecuación para una condición de precipitación o de caudal constante en la superficie.

Mein y Larson consideraron tomar en cuenta un tiempo inicial t_p hasta alcanzar el inicio de la formación de la lámina de agua en la superficie, este tiempo es definido

$$\text{por } t_p = \frac{I_p}{i_p} \text{ donde } I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)}$$

se forma una película de agua en la superficie, e i_p es igual a la precipitación o caudal de llenado.

La Ecuación 4-5 define la infiltración en función al tiempo, entre los tiempos t_p y t

$$K_s (t - t_p) = I(t) - \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left(1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right) \quad 4-6$$

Esta parte puede ser revisada a mayor detalle en Libardi (2012).

4.2.2 Conductividad hidráulica en la zona de transmisión

La conductividad hidráulica de la zona de transmisión puede ser estimada a partir de ecuaciones empíricas que provienen de datos experimentales y de otras que se derivan de modelos físicos que presentan a la conductividad hidráulica en función de la humedad y del potencial matricial. Los modelos que utilizan ecuaciones empíricas son por lo general, aplicables en situaciones específicas para las cuales fueron desarrolladas, en cuanto a modelos que provienen de modelos físicos tienen la desventaja de utilizar parámetros obtenidos, como la conductividad hidráulica de campo, por ejemplo, que podrían ser de baja confiabilidad y que podrían llevar a obtener resultados no apropiados para cada situación y características de suelos.

En una zona de suelo no saturada existe una presión negativa denominada succión y esta succión, o presión matricial, está directamente relacionada al volumen de agua que contienen los vacíos del suelo denominada humedad volumétrica θ . La relación entre la humedad volumétrica y la succión se denomina curva características o curva de retención de agua y depende del tipo de suelo. En la Figura N° 4.3 se presentan gráficas típicas de curvas características de una arena, limo y arcilla.

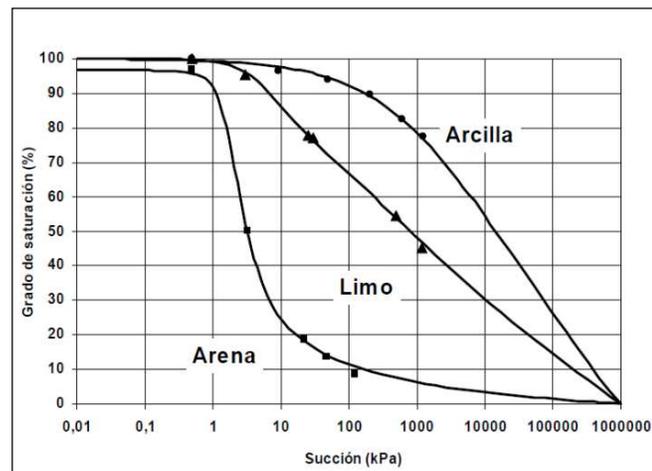


Figura N° 4.3 Curvas características para suelos con diferentes texturas
(Fuente: (4): Brandão, V.; Cecílio, R.; Pruski, F. & Da Silva, D., 2010)

Existen ecuaciones empíricas que representan estas curvas de retención de agua en el suelo, como las ecuaciones de Brooks e Corey (1964), o de Van Genuchten (1980), donde estas ecuaciones relacionan grados de saturación, presiones

matriciales y coeficientes adimensionales.

La conductividad hidráulica en los suelos no saturados depende de la succión, en consecuencia, también de la humedad volumétrica. La conductividad hidráulica disminuye al disminuir el contenido de agua y aumenta al aumentar la humedad y lo hace hasta alcanzar la conductividad hidráulica saturada. En la Figura N° 4.4, para un suelo arenoso y arcilloso, se observa como la conductividad hidráulica aumenta conforme la succión disminuye (eje negativo) y aumenta hasta alcanzar el valor de la conductividad hidráulica saturada.

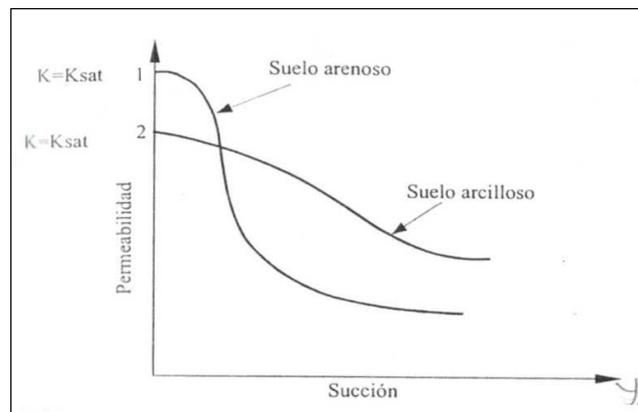


Figura N° 4.4 Relación entre la conductividad hidráulica y succión
(Fuente: Elaboración propia)

En el presente trabajo se utilizó la ecuación de Van Genuchten (1980) para estimar las curvas de retención de agua en los suelos.

La ecuación de Van Genuchten (1980) es una función continua que contiene tres parámetros de ajuste y tiene la siguiente forma:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad 4-7$$

En donde α, n, m son los parámetros de ajuste, ψ es la succión del suelo en el punto de interés, θ_s es el contenido de agua volumétrico saturado, y θ_r es el contenido de agua residual del suelo. En la Figura N° 4.5 se presenta una gráfica de una curva característica típica presentada por Van Genuchten (1980).

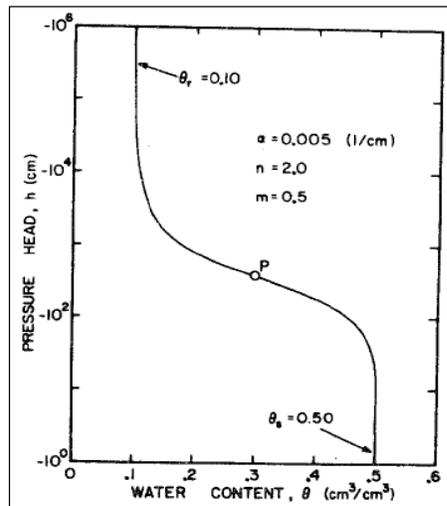


Figura N° 4.5 Gráfico típico de curva característica basado en la ecuación de Van Genuchten (1980)
(Fuente: (23): Van Genuchten, M., 1980)

Para mayores alcances de esta parte se puede revisar Van Genuchten (1980).

Existen algunos métodos para estimar la conductividad hidráulica de la zona de transmisión que se determinan a partir de la ecuación de la curva característica. Entre los métodos más conocidos se encuentran la propuesta por Alexander e Skaggs (1986) y Van Genuchten (1980) que utilizan las ecuaciones de Burdine y Mualem.

La ecuación de Van Genuchten para determinar la conductividad hidráulica no saturada para una humedad determinada utilizando la ecuación de Burdine presenta la siguiente forma:

$$K(\theta_w) = K_r(\theta_w)K_s \quad 4-8$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada y $K_r(\theta_w)$ se calcula de la siguiente manera:

$$K_r(\theta_w) = K_r(S_e) = S_e^2 \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right] \quad 4-9$$

Donde $0 < m < 1$, $n > 2$ y $m = 1 - 2/n$.

$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$, donde θ_w es la humedad volumétrica del suelo, θ_r es la humedad

volumétrica residual de la curva característica del suelo, y θ_s es la humedad

volumétrica de saturación de la curva característica del suelo.

Utilizando la ecuación de Mualem, Van Genuchten también obtuvo una ecuación similar para la determinación de la conductividad hidráulica no saturada para una humedad determinada.

$$K_r(\theta_w) = K_r(S_e) = S^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad 4-10$$

Donde $0 < m < 1$, y $m = 1 - 1/n$.

4.2.3 Potencial matricial en el frente de humedecimiento

El potencial matricial en el frente de humedecimiento, para el presente trabajo, se determinó usando el método propuesto por Slack (1980), que considera que en la zona de transmisión la conductividad hidráulica es menor a la conductividad hidráulica saturada. La ecuación de Slack para el cálculo del potencial matricial es la siguiente:

$$\psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} \quad 4-11$$

Donde ψ_e es potencial matricial correspondiente a la presión de entrada de aire.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}, \text{ y } a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right)$$

4.3 MÉTODO NUMÉRICO DE ANÁLISIS INFILTRACIÓN

Los modelos matemáticos para flujos en medios porosos siguen básicamente la ecuación de Richard's, que es una ecuación de conservación de masa y tiene como base la ecuación de Darcy. El programa Hydrus 1D de la empresa PC-PROGRESS utiliza el código SWMS_3D, un código para simular el flujo de agua y transporte de solutos en tres dimensiones para medios de saturación variables desarrollada por J. Šimůnek, K. Huang & Th. Van Genuchten (1998). El programa simula el movimiento de flujo de agua en un medio poroso en una dimensión, resuelve la ecuación de Richard's para flujo en condiciones saturadas y no saturadas y en regímenes permanente y transitorio, utilizando el método de

elementos finitos. Este software fue utilizado para las simulaciones numéricas del presente trabajo. Mayores alcances sobre el programa Hydrus 1D pueden ser revisados en Šimůnek & Van Genuchten & Šejna (2011).

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN

5.1 CONSIDERACIONES INICIALES

A partir de los niveles freáticos medidos en las calicatas se elaboraron algunas líneas isopiezas que intentan abarcar la extensa zona donde se proyectan las lagunas de salmuera. En la Figura N° 5.1 se presenta un grupo de líneas isopiezas en la zona donde se ejecutaron las calicatas.

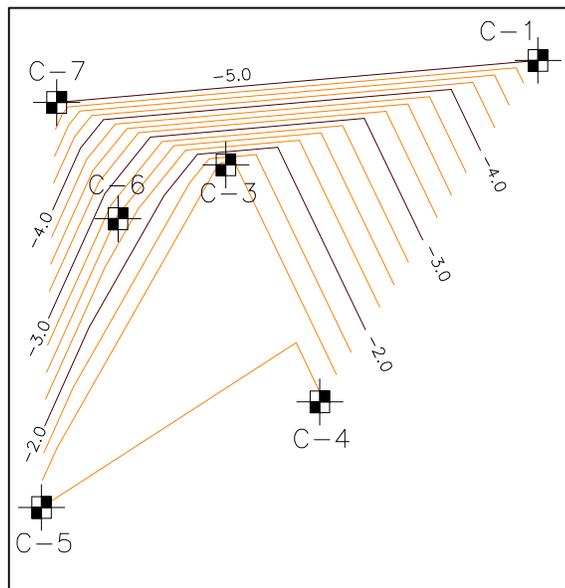


Figura N° 5.1 Mapa de isopiezas en el área de las lagunas
(Fuente: Elaboración propia)

Las lagunas de salmueras presentarán dimensiones aproximadas de 500 m y 2000 m en promedio, y perimetralmente se encontrarán confinadas por un dique de suelo compactado de 1.0 m de altura. Durante la explotación y operación, se deberá de asegurar mantener una carga hidráulica de 0.30 m en superficie, con caudales de llenado variables, de acuerdo con la evaporación estacional y filtraciones, además de permitir la formación de un fondo consistente para la explotación de potasio.

En el proceso de infiltración se considera que inicialmente el frente de saturación avanzará en sentido descendente a través del perfil del suelo no saturado, llenando los vacíos con agua, saturándolo, y de forma parcial y progresiva, aparecerá la primera lámina de agua en superficie. Conforme esta lámina aumenta

y logra alcanzar una carga hidráulica libre de 0.30 m, la tasa de infiltración del suelo va disminuyendo hasta un valor constante. De acuerdo con las indicaciones para la operación, el caudal de llenado deberá ser de 400 mm/hr/m².

Este proceso de infiltración será periódico para cada vez que se desee explotar el potasio, y debido a las características climatológicas del lugar se considera que, al inicio de cada ciclo de explotación, el perfil de suelo nuevamente se encuentra no saturado.

5.2 ANÁLISIS DE INFILTRACIONES

En los análisis de infiltración se utilizaron, el método analítico de Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML), y un método numérico de modelamiento utilizando el programa Hydrus 1D. En la Tabla N° 5.1 se presenta un resumen consolidado de los parámetros hidráulicos de las unidades de producción, considerando las estratificaciones de los suelos identificados. Los valores presentados provienen de los ensayos de laboratorio, de las ecuaciones de Van Genuchten (1980) para las curvas características, y de Slack (1980).

Tabla N° 5.1 Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de producción

UP	Prof. (m)	SUCS	Ks mm/hr	W (%)	S (%)	n (%)	θ_i	θ_r	Constantes	
									n	b
UP-1	0.00 - 0.30	ML	512.5	9.16	30.3	41.8	0.126	0.065	1.89	0.20
	0.30 - 1.25	SM	244.6	13.05	84.0	45.0	0.222	0.067	1.41	0.16
	1.25 - 3.40	SM	244.6	17.2	100	29.2	0.292	0.067	1.41	0.16
UP-2	0.00 - 0.60	SM	150	1.52	5.7	41.0	0.022	0.065	1.89	0.16
	0.60 - 2.45	SM	150	9.53	41.7	41.0	0.150	0.065	1.89	0.16
	2.45 - 3.40	SM	150	17.53	100	41.0	0.293	0.065	1.89	0.16
UP-3	0.00 - 0.50	SM	1200	2.25	8.5	41.0	0.033	0.065	1.89	0.16
	0.50 - 3.15	MH	1.98	23.93	63.3	38.0	0.294	0.068	1.09	0.24
	3.15 - 4.00	MH	1.98	66.64	99.6	38.0	0.586	0.068	1.09	0.24
UP-4	0.00 - 1.40	ML	586.8	11.93	21.7	46.0	0.125	0.034	1.37	0.20
	1.40 - 4.00	CH	0.18	18.33	75.5	38.0	0.282	0.068	1.09	0.22
UP-5	0.00 - 1.40	ML	144.0	30.67	66.7	51.5	0.334	0.034	1.37	0.20
	1.40 - 2.50	SM	130.0	43.5	100	52.2	0.522	0.065	1.80	0.16
UP-6	0.00 - 1.20	SM	90.6	9.16	17.3	41.0	0.097	0.065	1.89	0.15

UP	Prof. (m)	SUCS	Ks mm/hr	W (%)	S (%)	n (%)	θ_i	θ_r	Constantes	
									n	b
	1.20 - 2.80	SM	2.18	41.1	100	41.0	0.40	0.065	1.89	0.15

(Fuente: Elaboración propia)

Nota:

UP: Unidades de producción.

Ks: Conductividad hidráulica saturada.

W (%): Humedad natural.

S(%): Grado de saturación.

n (%): Porosidad.

θ_i : Humedad volumétrica inicial.

θ_r : Humedad volumétrica residual.

n y b: Constantes de los modelos (obtenidos de bibliografía)

Se puede observar en la Tabla N° 5.1 dos valores de humedad volumétrica residual mayores que la humedad volumétrica inicial o natural del suelo, teóricamente no puede ser posible debido a que la humedad volumétrica residual representa la cantidad de agua que se encuentra entre los poros a partir de la cual un aumento en la succión no producen variaciones significativas en la humedad del suelo. Para los cálculos se asumieron humedades volumétricas iniciales mayores que el residual de acuerdo con los de los estratos inferiores.

5.2.1 Método analítico Green- Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

Este método analítico fue desarrollado para perfiles de suelos que presenten un solo estrato. Para el presente estudio, es necesario entonces representar los perfiles de suelos de las lagunas como un solo suelo, es decir, determinar conductividades hidráulicas equivalentes, y parámetros de los suelos representativos para cada perfil.

En el proceso de infiltración va a existir una lámina de agua que desciende y humedece el perfil del suelo, sin embargo, debido a la existencia de aire atrapado en los poros y de difícil desplazamiento, no se logrará alcanzar la saturación. En los cálculos solamente para este método analítico (GAML), no se deberá entonces utilizar la humedad volumétrica saturada, en vez una humedad volumétrica de zona de transmisión θ_w indicada en las ecuaciones anteriores, y de variar la humedad también presentará una reducción la conductividad hidráulica. En la Tabla N° 5.2 se muestran las conductividades hidráulicas equivalentes y parámetros representativos para cada unidad de producción del perfil de suelo.

Tabla N° 5.2 Parámetros hidráulicos equivalente utilizados para cada unidad de producción

UP	N.F (m)	Ks (mm/hr)	θ_i	θ_r	θ_s	θ_w ($0.9 \cdot \theta_s$)	ψ_e (cm)	Constantes	
								n	b
UP-1	1.25	512.0	0.126	0.065	0.41	0.369	15.0	3.5	0.20
UP-2	2.45	150.0	0.150	0.065	0.41	0.369	15.0	3.5	0.20
UP-3	5.0(*)	800.0	0.200	0.065	0.38	0.342	14.0	2.0	0.20
UP-4	5.0(*)	586.0	0.125	0.034	0.46	0.414	62.5	2.0	0.20
UP-5	1.40	160.0	0.334	0.034	0.46	0.414	65.0	1.90	0.35
UP-6	1.20	95.0	0.097	0.065	0.41	0.369	40.0	3.0	0.25

(Fuente: Elaboración propia)

Nota:

UP: Unidades de producción.

Ks: Conductividad hidráulica saturada equivalente.

 θ_i : Humedad volumétrica inicial. θ_r : Humedad volumétrica residual. θ_s : Humedad volumétrica saturada. θ_w : Humedad volumétrica de zona de transmisión. ψ_e : Presión matricial que corresponde a la presión de entrada de aire.

n y b: Constantes de los modelos (obtenidos de bibliografía)

NF: Niveles freáticos de cada unidad de producción.

(*) Niveles freáticos estimados a partir del mapa local de isopiezas.

De acuerdo con la teoría presentada de infiltración, métodos de análisis, cálculos de conductividades hidráulicas y presión matricial en la zona de transmisión, se preparó para cada unidad, una memoria de cálculo donde se determinaron los tiempos necesarios para observar la primera lámina de agua libre en la superficie, y tiempos para conseguir la carga hidráulica de 30.0 cm necesaria para la explotación.

El método analítico de GAML no considera niveles freáticos, por lo que se consideró un perfil vertical infinito y se asumió para los cálculos, parámetros hidráulicos equivalentes de los estratos no saturados. En la Tabla N° 5.3 se muestra un resumen de los resultados y en el Anexo IV las memorias de cálculos para cada unidad de producción.

Tabla N° 5.3 Resumen de resultados de los cálculos por el método analítico de GAML

UP	q (mm/hr/m ²)	H _i (m)	S _e	K(θ_w) (mm/hr)	ψ_f (cm)	I _p (mm)	t _p (min)	H ₁ (m)	H ₂ (m)	T ₁ (min)
UP-1	400.0	0.30	0.881	254.1	16.17	79.99	12.0	0.20	0.38	37.2
UP-2	400.0	0.30	0.881	74.44	16.12	9.58	1.44	0.02	0.06	4.8
UP-3	400.0	0.30	0.879	205.87	14.86	28.37	4.26	0.07	0.29	22.3
UP-4	400.0	0.30	0.892	166.21	67.50	160.76	24.11	0.35	0.67	64.70
UP-5	400.0	0.30	0.892	40.53	69.70	9.90	1.49	0.022	0.05	4.6
UP-6	400.0	0.30	0.881	42.42	40.00	16.36	2.45	0.04	0.08	5.8

(Fuente: Elaboración propia)

Nota:

UP: Unidades de producción.

q: caudal de llenado por m².

H_i : Carga hidráulica libre en la superficie.

S_e : Grado de saturación efectiva.

K(θ_w) : Conductividad hidráulica en la zona de transmisión.

ψ_f : Potencial matricial en el frente de humedecimiento.

I_p : Lamina infiltrada antes del empozamiento.

t_p : Tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial.

H₁ : Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento.

H₂ : Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidráulica libre en la superficie.

T₁ : Tiempo transcurrido para formar la carga hidráulica libre de 30 cm en la superficie.

5.2.2 Modelamiento numérico

Para el desarrollo de los modelos numéricos se utilizó el programa Hydrus 1D, que permitió determinar tiempos de llenado para alcanzar la carga hidráulica de 30.0 cm, con un caudal de llenado de 400 mm/hr/m², de acuerdo con lo requerido para la operación. Así mismo, también se obtuvieron perfiles de saturación y variaciones de cargas hidráulicas para tiempos previstos.

La construcción de los modelos consistió en dividir el perfil vertical del suelo de cada unidad de producción, en tramos uniformes, añadiendo condiciones iniciales y de contorno, de acuerdo con cada característica de análisis en cada perfil de suelo de las lagunas de salmuera.

En los modelos, se consideró dividir los perfiles de suelos en 100 tramos iguales (malla de elementos finitos), incluyendo, como condición inicial, las humedades volumétricas iniciales representativas, y como condición de contorno, el caudal de llenado de 400 mm/hr/m². Además, se representaron los niveles freáticos y zonas saturadas. Como puntos de observación se eligieron puntos ubicados en la superficie.

En la Tabla N° 5.4 se presentan las características y parámetros hidráulicos utilizados para cada unidad de producción.

Tabla N° 5.4 Resumen de parámetros hidráulicos utilizados

UP	N.F (m)	Profundidad de estratos (m)	Ks (mm/hr)	θ_r	θ_s	α (1/mm)	n
UP-1	1.25	0.0 - 0.30	512.5	0.065	0.41	0.0075	1.89
		0.0 - 1.25	244.6	0.067	0.45	0.002	1.41
UP-2	2.45	0.0 - 0.60	150.0	0.065	0.41	0.0075	1.89
		0.60 - 2.45	150.0	0.065	0.41	0.0075	1.89
UP-3	5.0(*)	0.0 - 0.50	1200	0.065	0.41	0.0075	1.89
		0.50 - 1.00	1.99	0.068	0.38	0.0008	1.09
UP-4	5.0(*)	0.0 - 1.40	586.0	0.034	0.46	0.0016	1.37
		1.40 - 5.00	0.18	0.068	0.38	0.0008	1.09
UP-5	1.40	0.0 - 1.40	144.0	0.034	0.515	0.0016	1.37
UP-6	1.20	0.0 - 1.20	90.60	0.065	0.41	0.0075	1.89

(Fuente: Elaboración propia)

Nota:

UP : Unidades de producción.

N.F. : Nivel freático.

Ks : Conductividad hidráulica saturada.

θ_r : Humedad volumétrica residual.

θ_s : Humedad volumétrica saturada.

α y n : Constantes de los modelos (obtenidos de bibliografía)

Unidad de producción UP-1

El tiempo estimado para la evaluación de infiltración en la unidad de producción UP-1 fue de 50.0 min.

De la Figura N° 5.2 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de la primera lámina de agua en la superficie es de 21 min, y para una carga hidráulica de 30.0 cm es de aproximadamente 34 min. Además, se verifica que para tiempos mayores al minuto 35, la carga hidráulica se hace constante, lo que supone que la tasa de infiltración también alcanzó un valor constante.

Observation Nodes: Pressure Heads

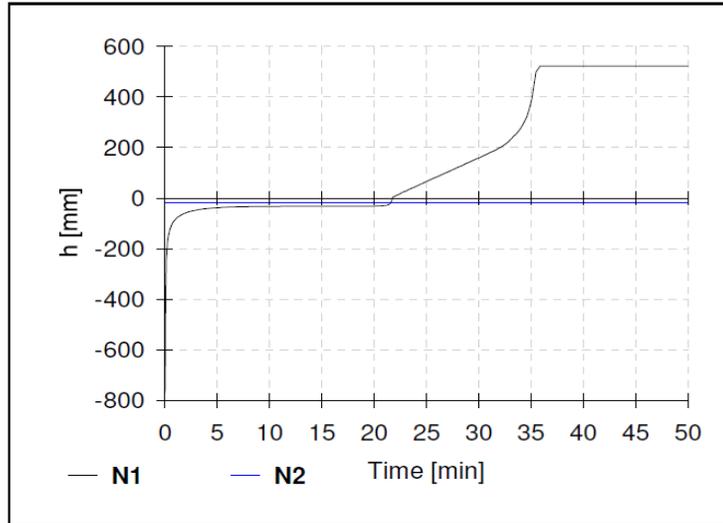


Figura N° 5.2 Carga hidráulica en la superficie en la UP-1 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Pressure Head

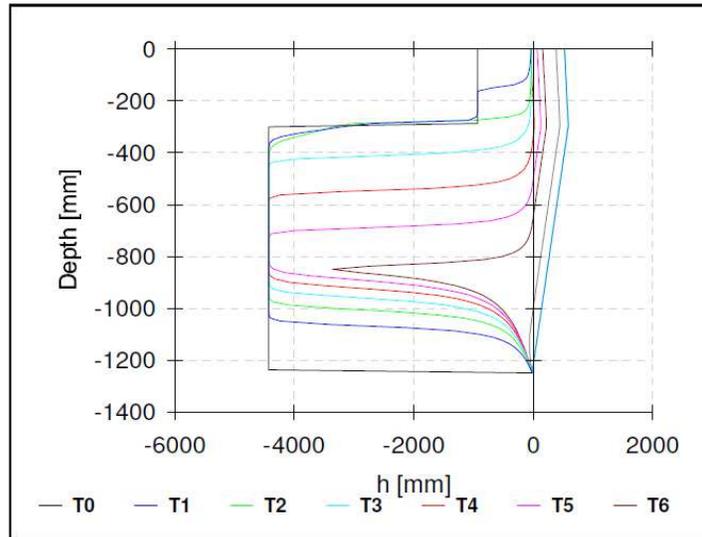


Figura N° 5.3 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.3 se observa el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos fueron: T0 = tiempo inicial, T1 = 5 min, T2 = 10 min, T3 = 15 min, T4 = 20 min, T5 = 25 min, T6 = 30 min.

Profile Information: Water Content

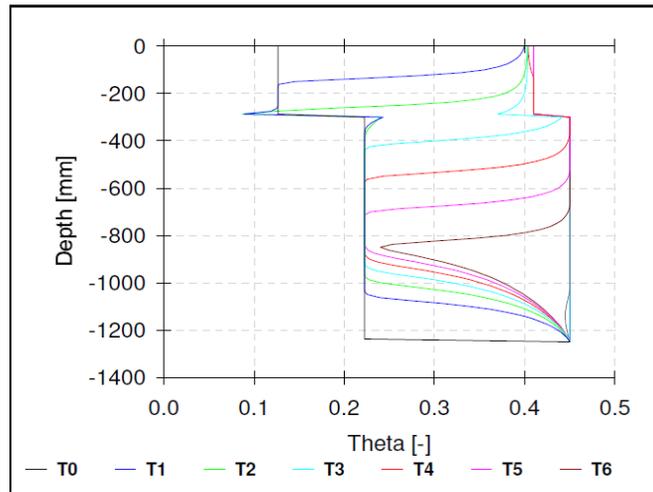


Figura N° 5.4 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.4 observamos la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-1. Para los tiempos. T0 = tiempo inicial, T1 = 5 min, T2 = 10 min, T3 = 15 min, T4 = 20 min, T5 = 25 min, T6 = 30 min.

Unidad de producción UP-2

Para la unidad de producción UP-2, el tiempo estimado para la evaluación de infiltración se consideró de 40.0 min. En la Figura N° 5.5 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de una primera lámina de agua en la superficie es de 3 min y para una carga hidráulica de 30.0 cm es de aproximadamente 7 min.

En la Figura N° 5.6 se observa el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos fueron: T0 = tiempo inicial, T1 = 5 min, T2 = 10 min, T3 = 15 min, T4 = 20 min, T5 = 40 min. Observamos que rápidamente se alcanza a formar una lámina libre de agua en la superficie, y que para el tiempo de 40 min de análisis no se consigue saturar el perfil de suelo, no alcanzando el nivel freático estimado a una profundidad de 2.45m.

Observation Nodes: Pressure Heads

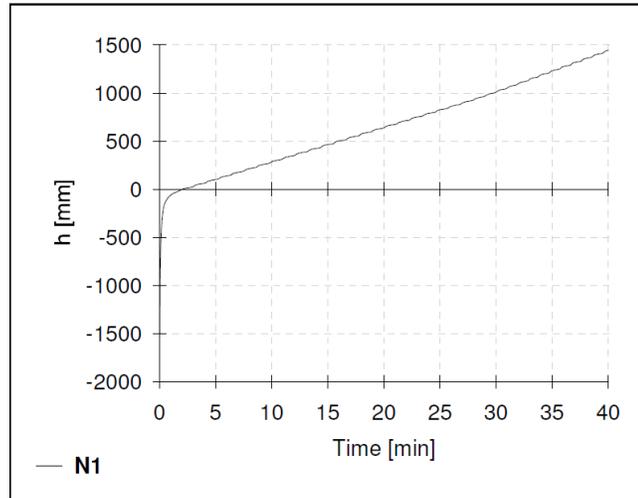


Figura N° 5.5 Carga hidráulica en la superficie en la UP-2 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Pressure Head

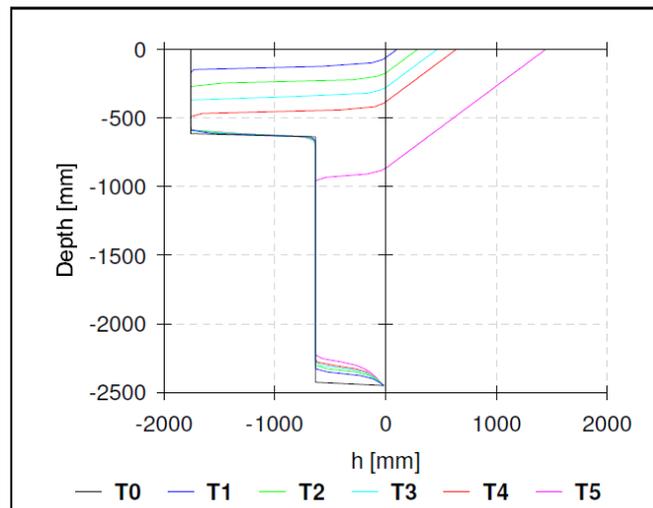


Figura N° 5.6 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-2 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

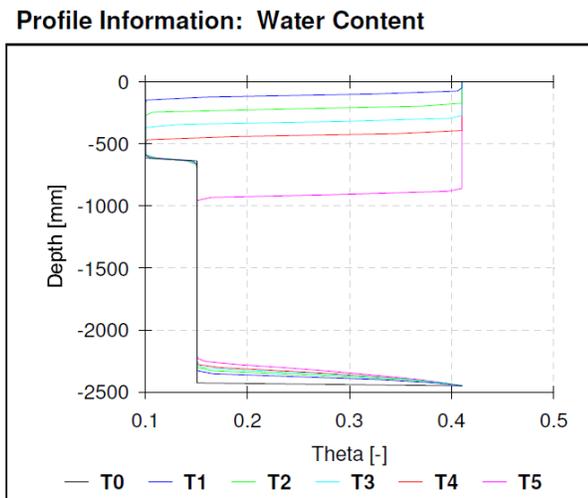


Figura N° 5.7 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-1 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.7 observamos la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-2, en los tiempos: T0 = tiempo inicial, T1 = 5min, T2 = 10 min, T3 = 15min, T4 = 20min, T5 = 40min.

Unidad de producción UP-3

El tiempo estimado para la evaluación de infiltración en la unidad de producción UP-3 se consideró de 30.0 min. En la Figura N° 5.8 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de la carga hidráulica de 30.0 cm fue de aproximadamente 24 min.

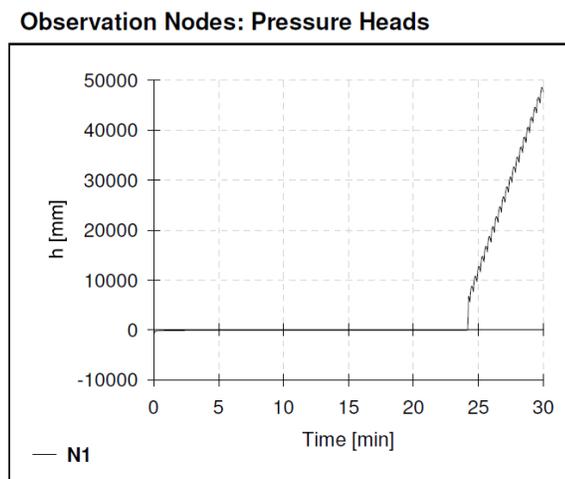


Figura N° 5.8 Carga hidráulica en la superficie en la UP-3 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.9 se observa el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos son: T0 = tiempo inicial, T1 = 6 min, T2 = 12 min, T3 = 18 min, T4 = 24 min, T5 = 30 min.

Profile Information: Pressure Head

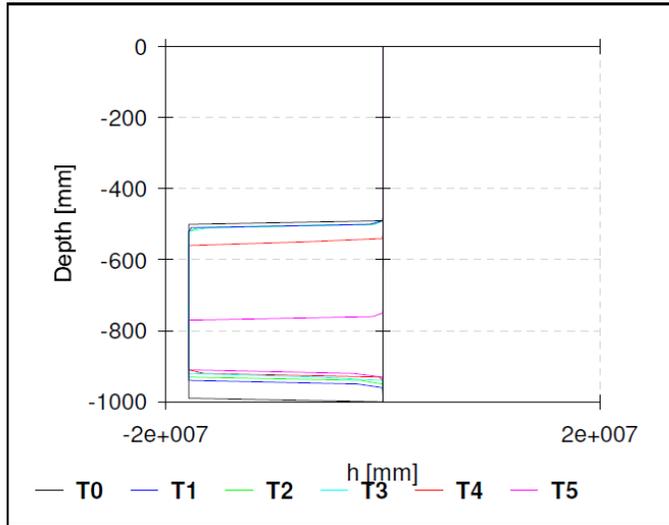


Figura N° 5.9 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-3 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Water Content

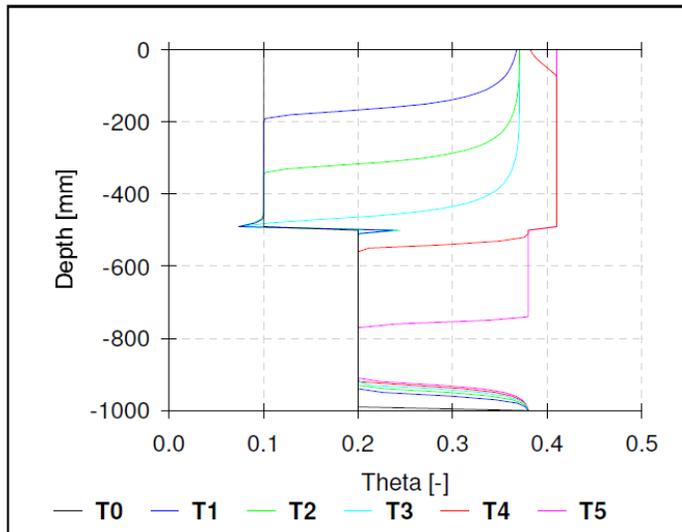


Figura N° 5.10 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-3 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.10 se puede observar la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-3 en los tiempos T0 = tiempo inicial, T1 = 6 min, T2 = 12 min, T3 = 18 min, T4 = 24 min, T5 = 30 min.

Unidad de producción UP-4

El tiempo estimado para la evaluación de infiltración en la unidad de producción UP-4 se consideró de 70.0 min. En la Figura N° 5.11 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de la carga hidráulica de 30.0 cm es de aproximadamente 70 min.

Observation Nodes: Pressure Heads

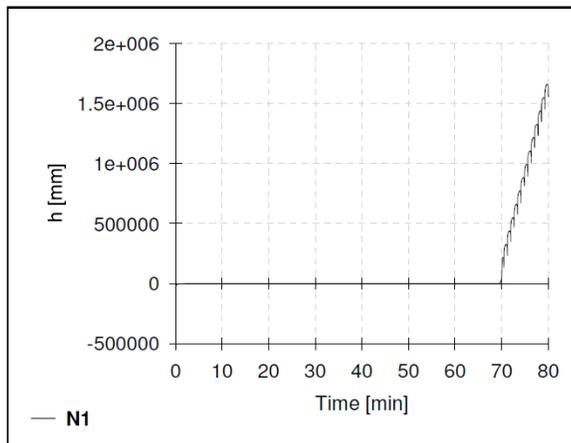


Figura N° 5.11 Carga hidráulica en la superficie en la UP-4 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.12 se puede verificar el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos fueron: T0 = tiempo inicial, T1 = 10 min, T2 = 20 min, T3 = 30 min, T4 = 40 min, T5 = 50 min, T6 = 60 min, T7 = 65 min, T8 = 67 min, T9 = 70 min, T10 = 80 min. Se observa que para el tiempo de 80 min aun el frente de humedecimiento no alcanza a saturar todo el perfil de suelo, hasta la profundidad estimada del nivel freático.

Profile Information: Pressure Head

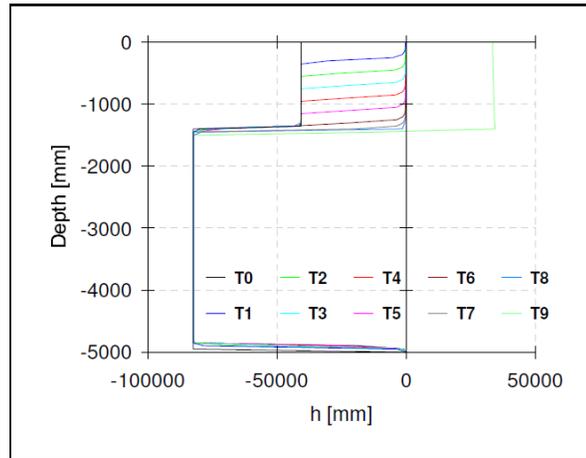


Figura N° 5.12 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-4 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Water Content

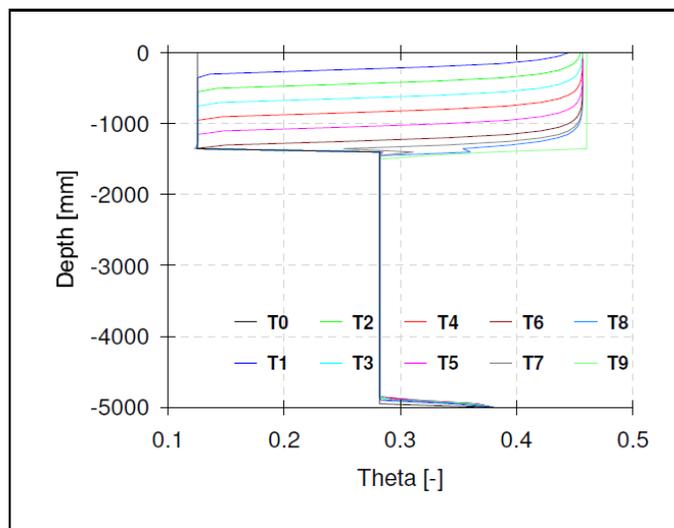


Figura N° 5.13 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-4 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.13 se puede verificar la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-4, en los tiempos T0 = tiempo inicial, T1 = 10 min, T2 = 20 min, T3 = 30 min, T4 = 40 min, T5 = 50 min, T6 = 60 min, T7 = 65 min, T8 = 67 min, T9 = 70 min, T10 = 80 min.

Unidad de producción UP-5

El tiempo estimado para la evaluación de infiltración en la unidad de producción UP-5 se consideró de 40.0 min. En la Figura N° 5.14 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de la primera lámina de agua en la superficie es de 2 min, y para una carga hidráulica de 30.0 cm es de aproximadamente 8 min., además se puede verificar que a partir del minuto 32 la carga hidráulica en la superficie es constante lo que indica que la tasa de infiltración también es constante a partir de ese momento.

Observation Nodes: Pressure Heads

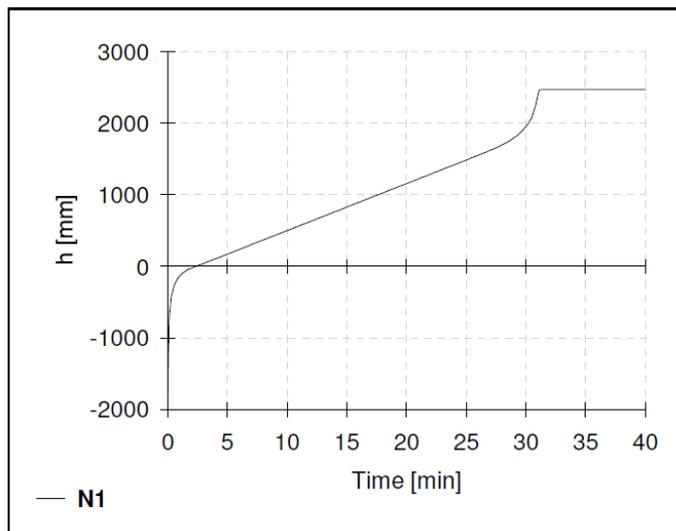


Figura N° 5.14 Carga hidráulica en la superficie en la UP-5 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.15 se observa el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos fueron: T_0 = tiempo inicial, T_1 = 4 min, T_2 = 8 min, T_3 = 12 min, T_4 = 16 min, T_5 = 20 min, T_6 = 24 min, T_7 = 28 min, T_8 = 32 min, T_9 = 36 min, T_{10} = 40 min.

Profile Information: Pressure Head

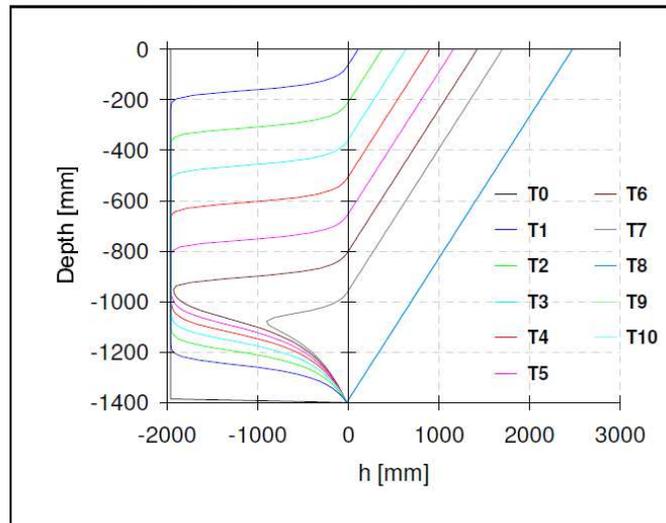


Figura N° 5.15 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-5 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Water Content

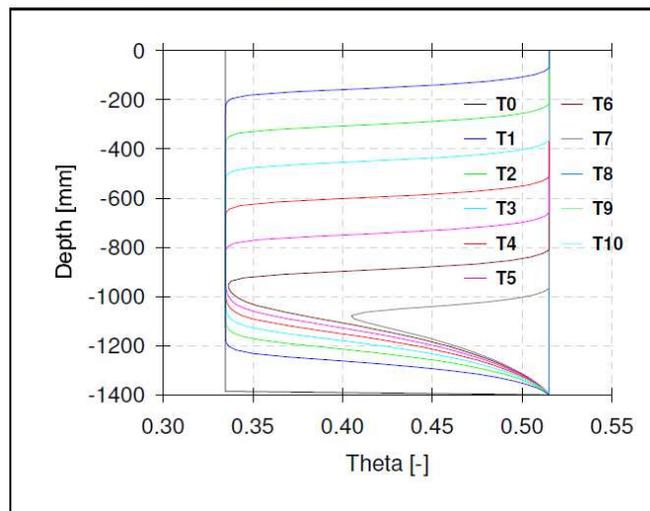


Figura N° 5.16 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-5 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.16 se puede verificar la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-5, en los tiempos T0 = tiempo inicial, T1 = 4 min, T2 = 8 min, T3 = 12 min, T4 = 16 min, T5 = 20 min, T6 = 24 min, T7 = 28 min, T8 = 32 min, T9 = 36 min, T10 = 40 min.

Unidad de producción UP-6

El tiempo estimado para la evaluación de infiltración en la unidad de producción UP-1 se consideró de 40.0 min. En la Figura N° 5.17 se observa que el tiempo transcurrido para la formación de la primera lámina de agua en la superficie es de 2 min y para una carga hidráulica de 30.0 cm es de aproximadamente 6 min.

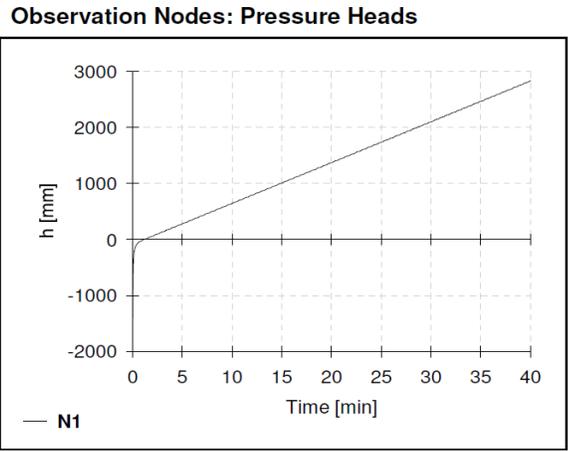


Figura N° 5.17 Carga hidráulica en la superficie en la UP-6 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.18 se observa el frente de humedecimiento para cada tiempo considerado. En esta unidad los tiempos fueron: T0 = tiempo inicial, T1 = 4 min, T2 = 8 min, T3 = 12 min, T4 = 16 min, T5 = 20 min, T6 = 24 min, T7 = 28 min, T8 = 32 min, T9 = 36 min, T10 = 40 min.

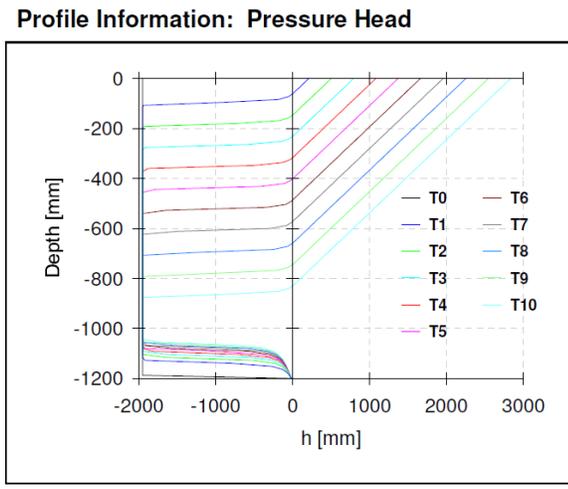


Figura N° 5.18 Carga hidráulica en el perfil del suelo en la UP-6 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

Profile Information: Water Content

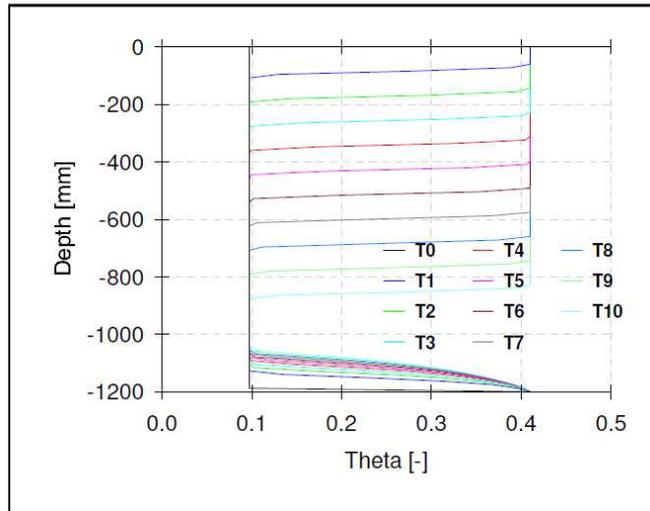


Figura N° 5.19 Humedad volumétrica en el perfil de suelo en la UP-6 (Hydrus 1D)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 5.19 se puede verificar la variación de la humedad volumétrica a lo largo del perfil de la unidad UP-6 en los tiempos T0 = tiempo inicial, T1 = 4 min, T2 = 8 min, T3 = 12 min, T4 = 16 min, T5 = 20 min, T6 = 24 min, T7 = 28 min, T8 = 32 min, T9 = 36 min, T10 = 40 min.

5.2.3 Análisis de resultados

De los cálculos analíticos y numéricos desarrollados se puede verificar resultados cercanos de tiempos, si bien es cierto en los métodos analíticos se realizan simplificaciones, los resultados muestran coherencia con los resultados numéricos que suponen ser más aproximados. En la Tabla N° 5.5 se presenta un resumen de los resultados de los cálculos para cada unidad de producción.

Tabla N° 5.5 Resumen de resultados de los cálculos por los métodos analíticos y numéricos.

UP	Método analítico		Método numérico	
	Tp (min)	Th (min)	Tp (min)	Th (min)
UP-1	12.0	37.2	21.0	34.0
UP-2	1.44	4.8	3.0	7.0
UP-3	4.26	22.3	--	24.0
UP-4	24.11	64.7	--	70
UP-5	1.49	4.6	2.0	8.0
UP-6	2.45	5.8	2.0	6.0

(Fuente: Elaboración propia)

Nota

Tp : Tiempo para la formación de la primera lámina de agua en la superficie.

Th : Tiempo para la formación de una carga hidráulica de 30.0 cm en la superficie.

En la UP-1 Los tiempos determinados para la formación de la carga hidráulica de 30.0 cm son bastantes próximos, sin embargo, los tiempos para la formación de la primera lámina existe una diferencia de casi 40% en valor. En la UP-2 Los resultados son bastantes cercanos, se pueden considerar aceptables para ambos casos. En la UP-3 el tiempo para la formación de la carga hidráulica de 30.0 cm son muy parecidos, sin embargo, por el método numérico no se pudo observar fácilmente el tiempo para la primera formación de la lámina libre, podría deberse a una necesidad de optimizar la discretización de la malla de elementos finitos. Además se observa que la humedad volumétrica saturada es alcanzada sin aun formarse una lámina libre de agua en las superficie, pero se estimó que el valor estaría muy cercano a los 24 min, y este resultado estaría muy lejano al obtenido por el método analítico.

En la UP-4 sucede algo muy similar a lo que ocurre en la UP-3, los tiempos para estimar la formación de la carga hidráulica de 30.0 cm son muy similares. En la UP-5 y UP-6 se pueden observar resultados muy similares.

De los resultados obtenidos por el método analítico y numérico se puede indicar que son bastantes adecuados y proporcionados para la escala del modelo.

CONCLUSIONES

Se desarrollaron trabajos de campo para el reconocimiento y caracterización de suelos de fondo en las seis unidades de producción, donde se ejecutaron pruebas de conductividad hidráulica, pruebas de densidad de campo, y se recolectaron muestras para realizar ensayos de mecánica de suelos en laboratorio.

Los estudios fueron planificados para realizar una primera evaluación de las condiciones de los suelos, con la finalidad de valorar las unidades de producción como alternativas para su uso como lagunas de explotación de salmuera. Se planificó solamente ejecutar una calicata en cada unidad de producción, para que posteriormente fueran ampliados los estudios en las unidades que presentaran condiciones adecuadas y favorables.

Se estimaron valores mensuales de precipitación y evapotranspiración, presentando las precipitaciones mensuales valores muy bajos en casi todos los meses del año, por lo que no fueron considerados en los análisis. Los valores de la evapotranspiración fueron calculados como información complementaria para proyectos que puedan realizarse en el entorno de las lagunas de salmuera.

Los resultados obtenidos de los análisis de infiltración se encuentran por debajo de los 60 minutos. El déficit por evaporación deberá ser controlado durante la operación para garantizar una carga hidráulica de 30 cm, aumentando la tasa de flujo de salmuera de acuerdo con la necesidad de carga hidráulica en la operación.

Para la caracterización hidráulica de los suelos se ejecutaron pruebas de conductividad hidráulica en las zonas saturadas y no saturadas. En la zona saturada se desarrollaron pruebas de agotamiento y recuperación, que consistió en abatir el nivel freático con bombas, para luego dejar que los niveles empiecen a recuperarse e ir midiendo los niveles en relación con el tiempo que transcurre para cada nivel recuperado. En la zona no saturada se empleó el método de carga variable, que consistió inicialmente en saturar, en lo posible, el tramo a ensayar para posteriormente también ir midiendo los niveles de agua que se infiltran en relación con el tiempo transcurrido por cada medida.

En las pruebas de conductividad hidráulica desarrolladas en la zona no saturada,

se utilizó agua potable como fluido, y no salmuera que sería lo recomendable. Sin embargo, no debería de existir mayor diferencia de resultados con las conductividades hidráulicas obtenidas. La conductividad hidráulica depende de la estructura del suelo (permeabilidad intrínseca), de la interacción partícula-fluido y propiedades del fluido que lo atraviesa.

La estructura del suelo no varía en las pruebas realizadas. En el caso de las interacciones partícula-fluido, podría existir mayor influencia si los suelos predominantes fueran arcillosos, en el caso de los suelos explorados y ensayados en el presente estudio, son mayoritariamente suelos arenosos. Si se toma el cociente del peso específico y viscosidad $\frac{\gamma}{\mu}$, tanto para el agua potable como de la salmuera, y estos dos se dividen, la proporción entre la salmuera y el agua potable es de 1.08. Por tanto, se asume, para estos casos particulares, que los valores obtenidos de conductividades hidráulicas con agua potable proporcionarían valores aceptables para realizar los análisis de infiltración de salmuera.

Para la caracterización geotécnica se ejecutaron pruebas de densidad *in situ* por el método del cono de arena, además de registrar y describir los suelos encontrados, y recolectar muestras para el desarrollo de ensayos de laboratorio. Esto permitió determinar las condiciones de las fases del suelo, permitiendo estimar el contenido volumétrico de agua, porosidad y grado de saturación, valores necesarios para la realización de los análisis de infiltración.

Se consideró realizar los análisis de infiltración en una sola dimensión, en la dirección vertical; esta aproximación podría resultar adecuada debido a las dimensiones proyectadas de 0.5 km x 2.0 km de las lagunas conforme a la pequeña carga hidráulica de 30.0 cm en la operación.

El caudal de llenado para las lagunas se consideró constante para todas con un valor de $q = 400 \text{ mm/hr/m}^2$ y una carga hidráulica de llenado de 30 cm. Sin embargo, se deberá de considerar una regulación de las tasas del caudal de salmuera a depositar, debido a los efectos de la evapotranspiración del lugar, de manera que se garantice la carga hidráulica promedio de 30 cm en la operación.

Se prevé que existirán varios ciclos de explotación de potasio, y para cada ciclo

una vez alcanzado una capa de precipitado que permita la explotación, se deberá nuevamente disponer de salmuera en la laguna hasta alcanzar la carga hidráulica de 30 cm. Sin embargo, es de esperarse que, en el transcurso de los ciclos de explotación, los suelos cambien sus condiciones iniciales, los poros del suelo progresivamente irán saturándose, aumentando el contenido volumétrico del agua y el grado de saturación, además de crearse una costra impermeable en la superficie de la laguna, y cada vez el caudal y tiempo de llenado deberían de ir disminuyendo.

Se desarrollaron análisis de infiltración por dos métodos: analítico y numérico. Para los análisis numéricos se utilizó el software Hydrus 1D de PC-PROGRESS, donde se consideró en los análisis para cada unidad de producción, una sola dirección (vertical) utilizando la caracterización geotécnica definida en los estudios, así como las conductividades hidráulicas, y las fases de los suelos como condiciones iniciales del modelo. Para los análisis analíticos, se elaboró una hoja de cálculo para realizar los cálculos por el método analítico de Green-Ampt modificado por Mein y Larson. Este método utiliza un perfil de suelo con un solo tipo de suelo, por lo cual, para el caso de perfiles con dos tipos de suelos, se utilizó parámetros geotécnicos e hidráulicos equivalentes. Los resultados por estos métodos proporcionan valores relativamente próximos, y esto permitió validar los tiempos calculados en los análisis de infiltración.

De los análisis numéricos y analíticos, se puede concluir que las unidades de producción que presentan adecuadas características para la explotación de salmuera resultan las unidades de producción UP-2, UP-5 y UP-6, por presentar menores tiempos de llenado, debido a sus características menos permeables de sus suelos de fondo. Las unidades de producción UP-1, UP-3, y UP-4 presentan mayores tiempos de llenado, sin embargo, la diferencia de condiciones entre estos dos grupos no es considerable, por lo que también podrían ser utilizados en un segundo orden de preferencia como lagunas de explotación.

En algunas lagunas de explotación de salmuera para la obtención de litio, en países como Argentina o Chile, por ejemplo, se utiliza un revestimiento de geomembrana en el fondo. El objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento hidráulico de los suelos de fondo para el almacenamiento de salmuera en las lagunas de explotación sin la colocación de revestimiento de

geomembrana. Los resultados de los análisis demuestran relativamente poco tiempo para alcanzar las alturas mínimas de operación de la salmuera (30 cm), resultando lugares adecuados para la explotación, sin embargo, y a favor, estos tiempos podrían disminuir debido a que los suelos progresivamente se empiecen a saturar, disminuyendo las tasas de infiltración, además de una probable formación de una costra salina en el fondo conforme se repita los ciclos de explotación.

RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado, se presentan las siguientes recomendaciones:

Realizar mayores estudios de mecánica de suelos que puedan aumentar, en lo posible, el conocimiento de toda el área dentro de cada unidad de producción, de tal forma que se pueda contar con una mayor información, y mejor caracterización geotécnica e hidráulica de los suelos.

En las pruebas hidráulicas de campo a desarrollar en los futuros estudios de mecánica de suelos, se deberá de considerar la utilización de salmuera como fluido en los tramos que se encuentran en la zona no saturada. Se recomienda, además, realizar las mismas pruebas con agua potable, de tal forma que se pueda comparar y validar las asunciones del presente estudio.

Desarrollar ensayos de laboratorio para la determinación de curvas características de los suelos de fondo de las lagunas de explotación, de tal manera que se pueda validar los análisis de infiltración y diseños propuestos.

Se recomienda desarrollar un modelo de balance de energía en las lagunas de salmuera para estimar los valores de evaporación.

Realizar un análisis costo-beneficio de considerar un revestimiento de geomembrana en el fondo contra el proceso de formación de una costra salina y saturación de los suelos en función al costo de la salmuera.

Evaluar la posibilidad, para una primera etapa o ciclo de explotación, regar los suelos con agua común o potable para conseguir saturar los suelos de tal forma que las primeras infiltraciones de salmuera sean mínimas y así aumentar el aprovechamiento de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) **Alexander, L. and Skaggs, R.W.**, "Prediction Unsaturated Hydraulic Conductivity From The Soil Water Characteristic". Transactions of ASAE, v. 29, n.1, p. 176-184, 1986.
- (2) **Ali S., Islam A., Mishra P. and Sikka A.**, "Green-Ampt Approximations: A Comprehensive Analysis", Journal of Hydrology, 535, p. 340-355, 2016.
- (3) **Borgesen, C.D., Jacobsen, O.H., Hansen, S. and Shaap, M.G.**, "Soil Hydraulic Properties Near Saturation, an Improved Conductivity Model", Journal of Hydrology, 334(1-4), p. 40-50, 2006.
- (4) **Brandão, V., Cecílio, R., Pruski, F. y Da Silva, D.**, "Infiltração da Água no Solo", edição N° 3, Editora UFV, Brasil, 2010.
- (5) **Brooks, R. and Corey, A.**, "Hydraulic Properties of Porous Media", Hydrology Paper 3. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. 1964.
- (6) **Custodio, E. y Llamas, M.R.**, "Hidrología Subterránea Tomo I", Segunda Edición, Ediciones Omega, Barcelona, 2001.
- (7) **Golder Associates**, "Diseño de ingeniería básica de la poza de evaporación - Fospac", 2013.
- (8) **Green, W.H. and Ampt, G.**, "Studies of Soil Physics", Part I - The Flow of Air and Water Through Soils. Journal of Agricultural Science, 4, p. 1-24, 1911.
- (9) **Hidroenergía Consultores en Ingeniería S.R.L.**, "Estudios de suelos zona C1 - Área 47.5 km² Cañamac - Sector Cañamac", preparado para SALSUD Salmueras Sudamericana, 2012.
- (10) **Jorge Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L.**, "Evaluación de filtraciones para lagunas de salmuera", preparado para Americas Potash S.A., 2011
- (11) **Libardi, P.**, "Dinâmica da Água no Solo", 2ª edição, Editora USP, Brasil, 2012.
- (12) **Luthin, J.**, "Drainage Engineering", Wiley, New York, 1966.

- (13) **Llanos, C.D.**, “Estudio geológico y mecánica de suelos para determinar la resistencia e impermeabilidad en sectores de salmueras”, preparado para Americas Potash, 2009.
- (14) **Mein, R. and Larson, C.**, “Modeling Infiltration During a Steady Rain. Water Resources Research”, 9(2), p. 384-394, 1973.
- (15) **Ministerio de Agricultura y Riego Perú**, “Normas decadales de temperatura y precipitación y calendario de siembras y cosechas”, 2013.
- (16) **Montoro, M.A. y Francisca, F.M.**, “Permeabilidad Intrínseca de Suelos Arenosos con Presencia de Partículas de Limo y Arcilla” CONICET, Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 11(1). Córdoba, 2011.
- (17) **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación – FAO**, CD-Rom, FAO_Training: Permeabilidad de Suelos de: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm.
- (18) **Pachepsky, Y. and Timlin, D.**, “Infiltration Into Layered Soil Covered With a Depositional Seal: A Green-Ampt Approach”, Int. Agrophysics, p. 21-30, 1996.
- (19) **Rawls, W., Brakensiek, D. and Saxton, K.**, “Estimation of Soil Water Properties. Transactions of the ASAE”, Vol. 25, Nº 5, p. 1316-1320 & 1328, 1982.
- (20) **Reichardt, K. y Timm, L.**, “Solo, Planta e Atmosfera, conceitos, processo e aplicações”, 2ª edição, Brasil, 2012.
- (21) **Rubio, C., Llorens, P. y Van Genuchten, M. Th.**, “Modelización del Flujo Transitorio en Suelos Franco-Limosos Utilizando Hydrus-1D”, VII Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo: ZNS'05, Servicio de Publicaciones, p. 257-561, 2005.
- (22) **SENAMHI**, “Atlas de evaporación en el Peru”, 1994.
- (23) **Simunek, J., Van Genuchten, M. and Sejna, M.**, “The HYDRUS-1D

Software Package for Simulating The one-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media". Version 2.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado. 1998.

- (24) **Šimůnek, M., Van Genuchten, M. and Šejna, M.**, "The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media", Technical Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, p. 258, 2011.
- (25) **Slack, D.**, "Modeling Infiltration Under Moving Sprinkler Irrigation Systems. Transactions of ASAE", v. 23, n. 3, p 596-600, 1980.
- (26) **Van Genuchten, M.** "Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, N° 5, 1980.

ANEXOS

ANEXO I
Registros de excavaciones

SOLICITADO		AMERICAS POTASH PERU S.A.			NIVEL FREATICO		1.20 m.				
PROYECTO		Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera			REGISTRO		CÉSAR TORRES PAITAN				
UBICACION		Unidad de Producción N° 06: SECHURA - PIURA			REVISADO POR		DR. J. ALVA H.				
PROFUNDIDAD		2.80 m	COORDENADAS	538382	9369286	FECHA		FEBRERO - 2011			
PROF. (m)	CLASIFICACION		COTA (m.s.n.m.)		DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITES DE CONSISTENCIA			ENSAYOS ESPECIALES	
	SUCS	AASHTO	SIMBOLO GRAFICO				W (%)	L.L. (%)	I.P. (%)	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/seg)	DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)
	SP				0.00 - 0.10 m. Arena mal gradada, suelta, seca. Presencia de raíces y plantas.	S/M	-	-	-	-	-
	SP-SM	A-1-a			0.10 - 0.40 m. Arena gruesa a media pobremente gradada con limos de baja plasticidad, suelta, seco, color marron claro con tonalidades blanquecinas y lentes de color negro. Presencia de gravillas, G=31.36%, A=60.59%, F=6.05%.	M-1	1.65	NP	NP		1.14
0.5	SW-SM	A-1-a			0.40 - 1.20 m. Arena gruesa a media bien gradada con limos de baja plasticidad, ligeramente humeda, color marron claro. Presencia de gravillas y lentes de color negro. G=16.53%, A=75.90%, F=7.57%.	M-2	9.16	NP	NP	7.30E+00	1.16
1											
1.5	SW-SM				1.20 - 1.80 m. Arena bien gradada limosa, finos de baja plasticidad, compacidad media. Se presenta estratos cementados con poros.					2.53E-03	
2											
2.5	SM	A-1-b			1.80 - 2.80 m. Arena limosa, finos de baja plasticidad, denso, color plomo. Se presenta el material cementado con poros. G=23.30%, A=64.26%, F=12.43%.	M-3	8.81	NP	NP	2.53E-03	
3											
3.5											
4											
4.5											
5											

ANEXO II
Ensayos de campo

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 4
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 1
PROFUNDIDAD (m.) : 0.30 - 0.45
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A-3
PESO DE TARA (g)	96.50
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	936.68
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	847.16
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11.93

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm ³)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8420
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2672
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5748
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm ³)	3010
PESO DE LA MUESTRA (gr)	3532
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.17
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11.93
DENSIDAD SECA (gr/cm³)	1.05

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	11.93
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.17
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.05

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 4
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 1
PROFUNDIDAD (m.) : 1.20 - 1.33
N° DE PRUEBA : N°2

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A-7
PESO DE TARA (g)	89.28
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	758.10
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	654.49
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	18.33

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm ³)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8010
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2717
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5293
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm ³)	2685
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4907
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.83
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	18.33
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.54

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	18.33
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.83
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.54

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA - UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 4
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 1
PROFUNDIDAD (m.) : 2.00 - 2.15
N° DE PRUEBA : N°3

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	B25
PESO DE TARA (g)	209.30
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	631.69
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	520.36
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	35.79

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm ³)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8285
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	3750
PESO DE ARENA DE ENSAYO	4535
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm ³)	2144
PESO DE LA MUESTRA (gr)	3945
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.84
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	35.79
DENSIDAD SECA (gr/cm³)	1.36

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	35.79
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³)	1.84
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.36

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 5
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 3
PROFUNDIDAD (m.) : 0.80 - 0.95
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	T31
PESO DE TARA (g)	193.60
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	595.63
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	501.27
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	30.67

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8080
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2946
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5134
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2572
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4337
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.69
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	30.67
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.29

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	30.67
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.69
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.29

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 6
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 4
PROFUNDIDAD (m.) : 0.10 - 0.25
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	2
PESO DE TARA (g)	179.45
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	859.35
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	848.33
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.65

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8100
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2030
PESO DE ARENA DE ENSAYO	6070
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	3240
PESO DE LA MUESTRA (gr)	3690
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.14
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.65
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.12

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.65
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.14
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.12

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA - UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 6
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 4
PROFUNDIDAD (m.) : 0.40 - 0.53
N° DE PRUEBA : N°2

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A-8
PESO DE TARA (g)	82.10
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	620.41
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	575.22
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8420
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2672
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5748
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	3010
PESO DE LA MUESTRA (gr)	3492
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.16
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.06

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.16
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.06

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 1
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 5
PROFUNDIDAD (m.) : 0.05 - 0.20
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A-1
PESO DE TARA (g)	92.24
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	728.83
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	675.40
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8107
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2456
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5651
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2941
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4441
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.51
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.38

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.16
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.51
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.38

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA - UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 1
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 5
PROFUNDIDAD (m.) : 0.90 - 1.05
N° DE PRUEBA : N°2

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	T18
PESO DE TARA (g)	216.42
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	948.17
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	863.70
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13.05

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8051
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	3304
PESO DE ARENA DE ENSAYO	4747
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2295
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4400
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.92
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13.05
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.70

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13.05
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.92
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.70

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 2
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 6
PROFUNDIDAD (m.) : 0.05 - 0.20
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A12
PESO DE TARA (g)	86.27
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	994.12
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	980.55
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.52

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8120
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2620
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5500
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2833
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4105
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.45
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.52
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.43

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	1.52
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.45
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.43

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 2
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 6
PROFUNDIDAD (m.) : 1.00 - 1.12
N° DE PRUEBA : N°2

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A9
PESO DE TARA (g)	84.36
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	938.90
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	864.52
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.53

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8134
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	3214
PESO DE ARENA DE ENSAYO	4920
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2419
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4165
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.72
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.53
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.57

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	9.53
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.72
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.57

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 3
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 7
PROFUNDIDAD (m.) : 0.20 - 0.35
N° DE PRUEBA : N°1

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	T40
PESO DE TARA (g)	173.28
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	940.01
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	923.14
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	2.25

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8303
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2280
PESO DE ARENA DE ENSAYO	6023
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	3207
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4770
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.49
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	2.25
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.45

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	2.25
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.49
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.45

LABORATORIO GEOTÉCNICO

DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556-82)

SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ.S.A
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
UBICACION : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 3
FECHA : FEBRERO DEL 2011
SONDAJE : CALICATA N° 7
PROFUNDIDAD (m.) : 1.10 - 1.25
N° DE PRUEBA : N°2

CONTENIDO DE HUMEDAD	
N° DE TARA (g)	A11
PESO DE TARA (g)	87.41
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (g)	827.90
PESO DE TARA + SUELO SECO (g)	768.43
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8.73

MUESTRA	
DENSIDAD DE ARENA EMPLEADA (gr/cm3)	1.4
PESO DEL FRASCO + EL CONO ANTES DE EMPEZAR EL ENSAYO (gr)	8188
PESO DEL FRASCO + EL CONO CON ARENA SOBRANTE (gr)	2690
PESO DE ARENA DE ENSAYO	5498
PESO DE ARENA DEL CONO	1534
VOLUMEN DEL HOYO (cm3)	2832
PESO DE LA MUESTRA (gr)	4763
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.68
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8.73
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.55

RESULTADOS	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	8.73
DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	1.68
DENSIDAD SECA (gr/cm3)	1.55

ANEXO III
Ensayos de laboratorio

LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTMD422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

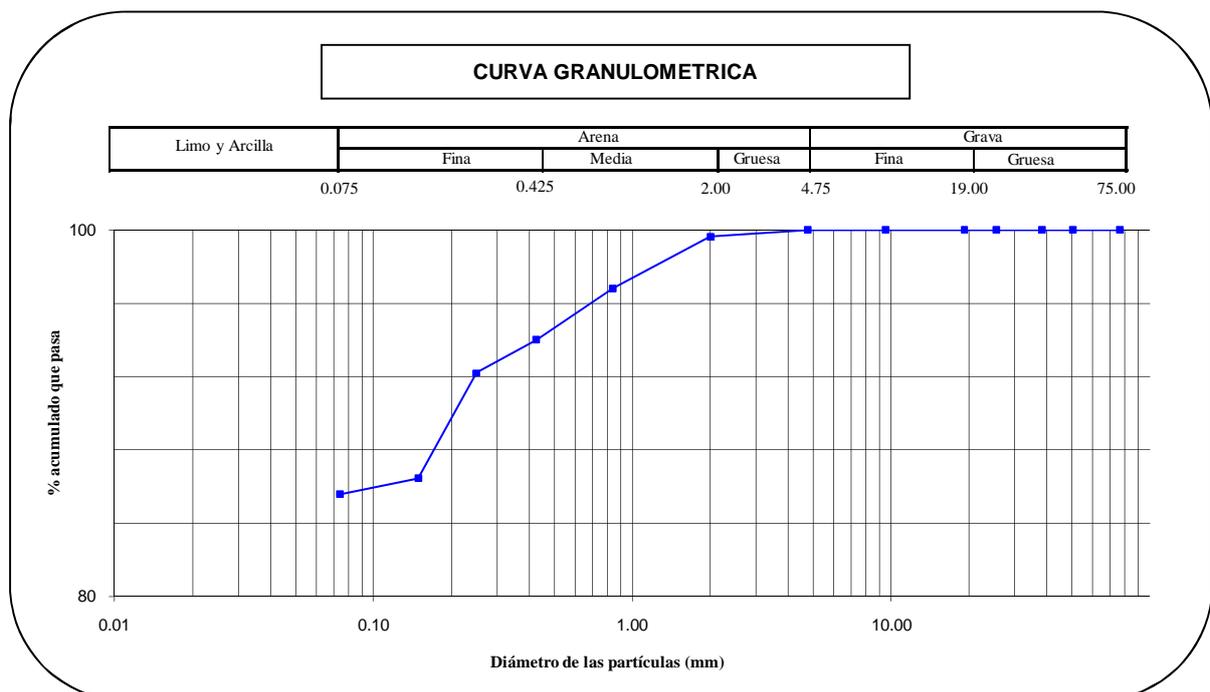
INFORME : LG-2011/0101
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-1	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,20 - 0,70	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	3"	76.200	100.00
	2"	50.300	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00
	1"	25.400	100.00
	3/4"	19.050	100.00
	3/8"	9.525	100.00
	Nº 004	4.760	100.00
	Nº 010	2.000	99.63
	Nº 020	0.840	96.82
	Nº 040	0.426	94.01
	Nº 060	0.250	92.22
Nº 100	0.149	86.44	
Nº 200	0.074	85.57	

Clasificación (S.U.C.S.)		ML
Descripción :		
Clasificación (AASHTO)		A-4
Descripción (AASHTO)		REGULA A MALO
Contenido de Humedad (%)		11.93
Límite Líquido (LL) (%)		19.07
Límite Plástico (LP) (%)		NP
Límite Contracción (LC) (%)		NP
Índice Plástico (IP) (%)		NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	14.43	Gruesa	0.37
		Media	5.62
% FINOS	85.57	Fina	8.44
			85.57



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

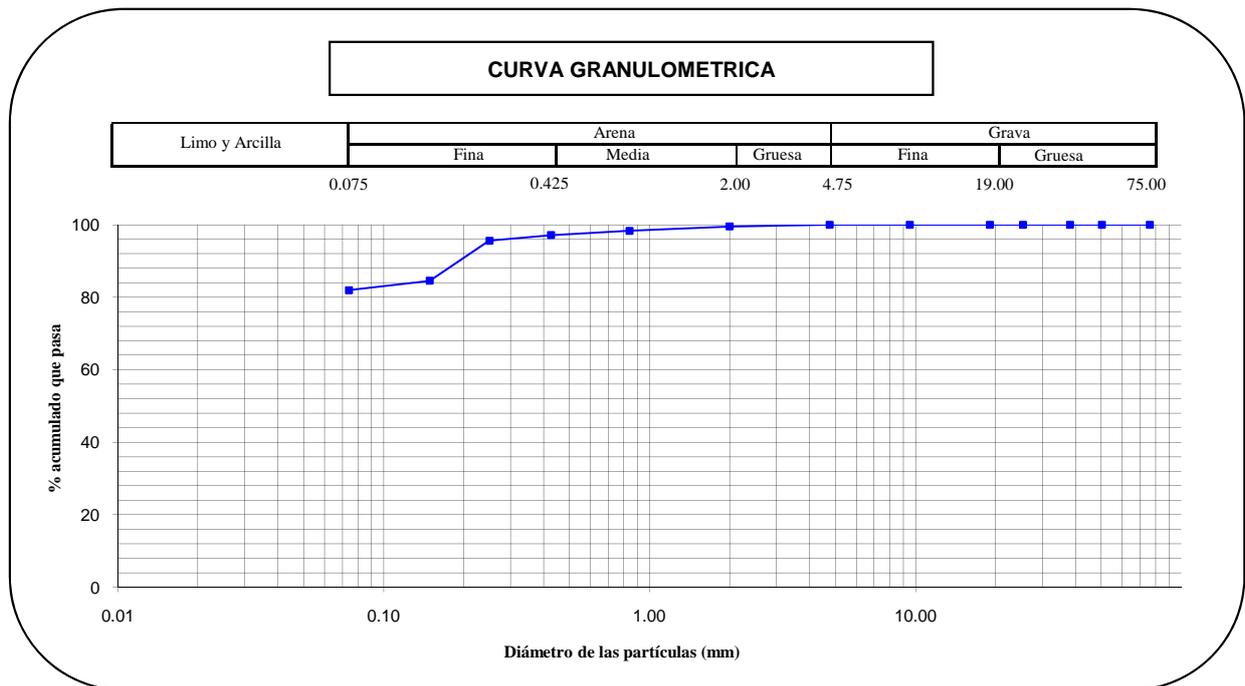
INFORME : LG-2011/0102
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-1	
Muestra		M-2	
Profundidad (m)		0,70 - 1,40	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200
		2 "	50.300
		1 1/2 "	38.100
		1 "	25.400
		3/4 "	19.050
		3/8 "	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
		Nº 100	0.149
Nº 200	0.074		

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	
Clasificación (AASHTO)	A-4
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	18.33
Límite Líquido (LL) (%)	20.56
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	18.06	Gruesa	0.46
		Media	2.39
		Fina	15.20
% FINOS	81.94		81.94



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

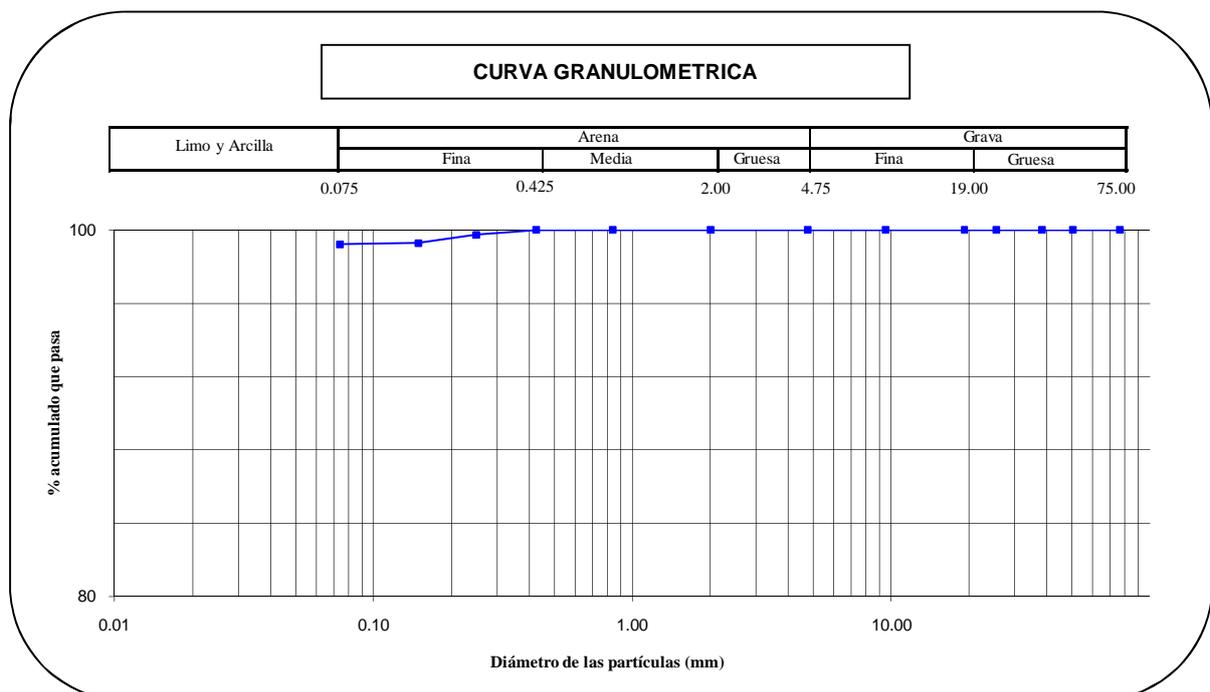
INFORME : LG-2011/0103
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-1	
Muestra		M-3	
Profundidad (m)		1,40 - 4,00	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	Porcentaje Acumulado que Pasa (%)		
	3"	76.200	100.00
	2"	50.300	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00
	1"	25.400	100.00
	3/4"	19.050	100.00
	3/8"	9.525	100.00
	Nº 004	4.760	100.00
	Nº 010	2.000	100.00
	Nº 020	0.840	100.00
	Nº 040	0.426	100.00
	Nº 060	0.250	99.75
Nº 100	0.149	99.29	
Nº 200	0.074	99.22	

Clasificación (S.U.C.S.)		CH - Fat clay
Descripción :		CH - Fat clay
Clasificación (AASHTO)		A-7-5
Descripción (AASHTO)		MALO
Contenido de Humedad (%)		35.79
Límite Líquido (LL) (%)		76.30
Límite Plástico (LP) (%)		32.14
Límite Contracción (LC) (%)		NP
Índice Plástico (IP) (%)		44.16

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	0.78	Gruesa	0.00
		Media	0.00
		Fina	0.78
% FINOS	99.22		99.22



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

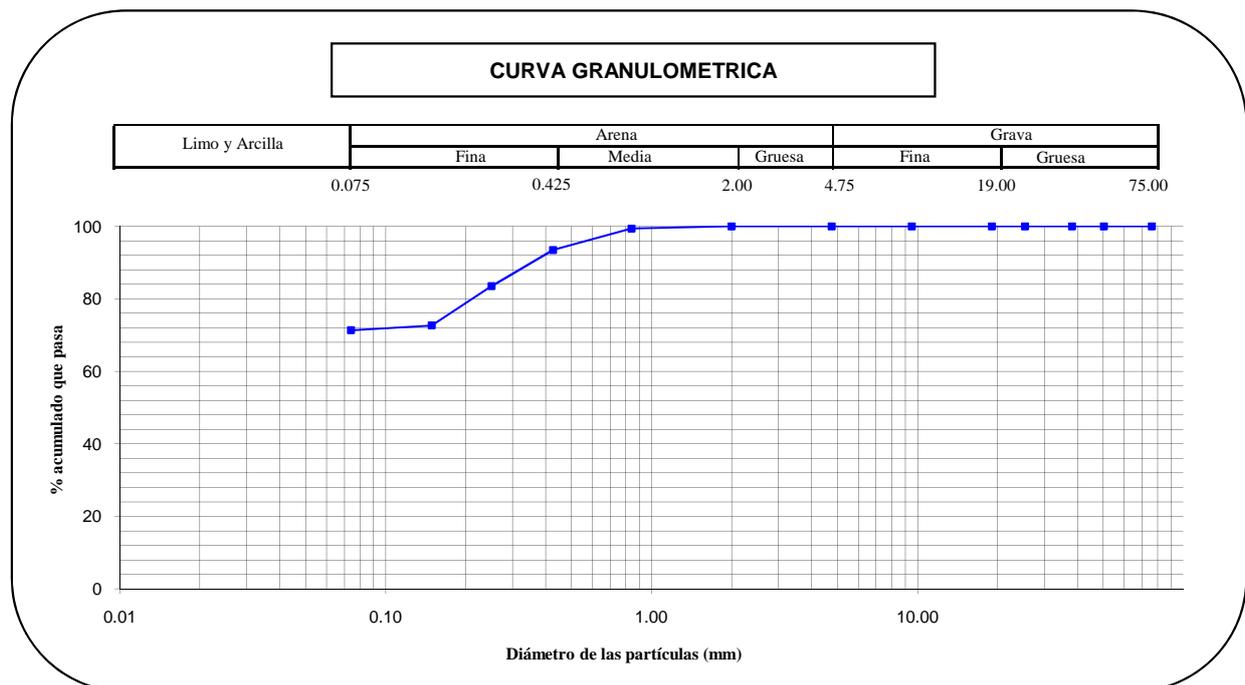
INFORME : LG-2011/0104
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 5: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-3	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,80 - 1,40	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	3 "	76.200	100.00
	2 "	50.300	100.00
	1 1/2 "	38.100	100.00
	1 "	25.400	100.00
	3/4 "	19.050	100.00
	3/8 "	9.525	100.00
	Nº 004	4.760	100.00
	Nº 010	2.000	100.00
	Nº 020	0.840	99.40
	Nº 040	0.426	93.50
	Nº 060	0.250	83.47
	Nº 100	0.149	72.66
	Nº 200	0.074	71.35

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	
Clasificación (AASHTO)	A-4
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	30.67
Límite Líquido (LL) (%)	19.08
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	28.65	Gruesa	0.00
		Media	6.50
		Fina	22.15
% FINOS	71.35		71.35



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

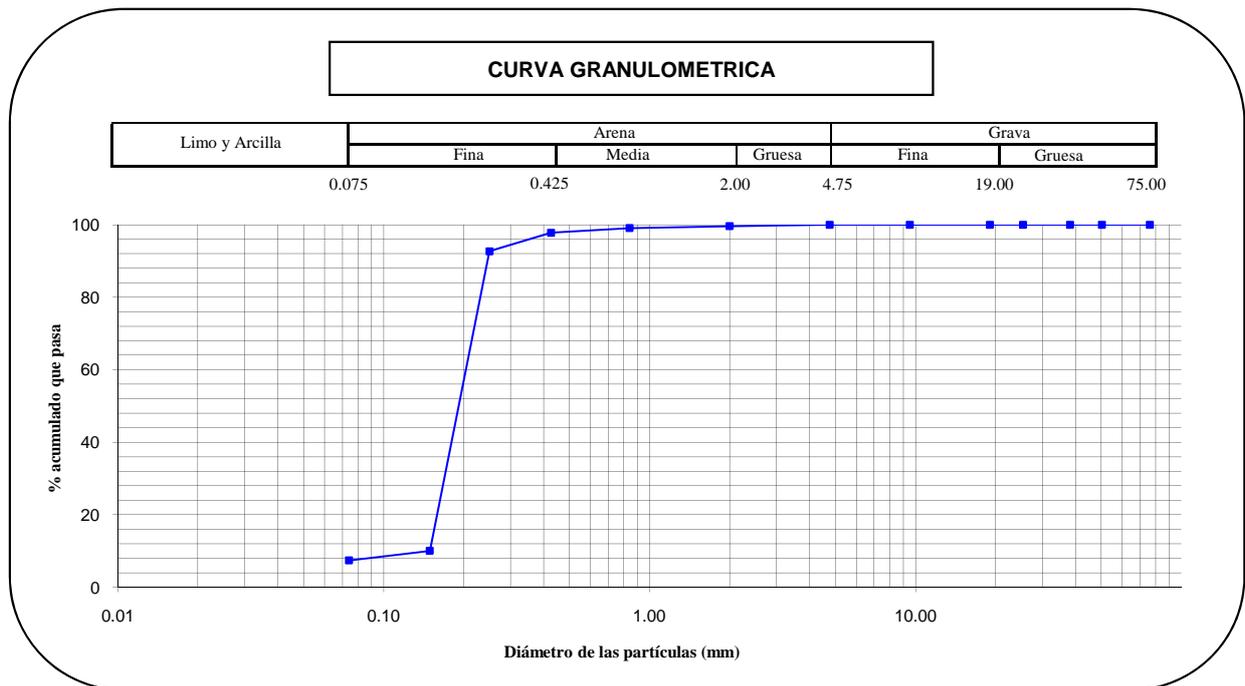
INFORME : LG-2011/0105
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 5: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-3		
Muestra		M-2		
Profundidad (m)		2,50 - 2,80		
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200	100.00
		2 "	50.300	100.00
		1 1/2 "	38.100	100.00
		1 "	25.400	100.00
		3/4 "	19.050	100.00
		3/8 "	9.525	100.00
		Nº 004	4.760	100.00
		Nº 010	2.000	99.60
		Nº 020	0.840	99.08
		Nº 040	0.426	97.80
		Nº 060	0.250	92.67
		Nº 100	0.149	10.05
Nº 200	0.074	7.40		

Clasificación (S.U.C.S.)	SP-SM
Descripción :	SP-SM - Poorly graded sand with silt
Clasificación (AASHTO)	A-2-4
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	12.56
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.15
D ₃₀ (mm)	0.17
D ₆₀ (mm)	0.20
Cu	1.39
Cc	0.95

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	92.60	Gruesa	0.40
		Media	1.80
		Fina	90.40
% FINOS	7.40		7.40



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

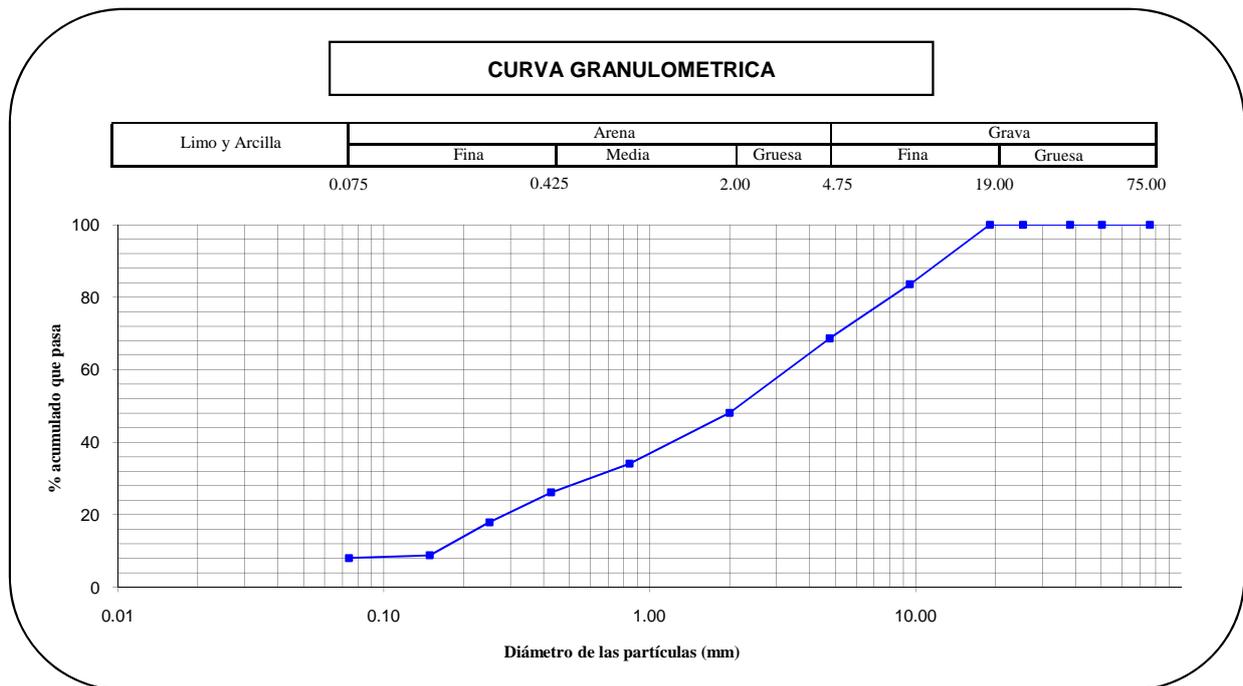
INFORME : LG-2011/0106
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-4	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,10 - 0,40	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200
		2 "	50.300
		1 1/2 "	38.100
		1 "	25.400
		3/4 "	19.050
		3/8 "	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
Nº 100	0.149		
Nº 200	0.074		

Clasificación (S.U.C.S.)	SP - SM
Descripción :	SP-SM - Poorly graded sand with silt and gravel
Clasificación (AASHTO)	A-1a
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	1.65
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.16
D ₃₀ (mm)	0.59
D ₆₀ (mm)	3.30
Cu	20.72
Cc	0.67

% GRAVA	31.36	Guesa	0.00
		Fina	31.36
% ARENA	60.59	Guesa	20.49
		Media	22.00
% FINOS	8.05	Fina	18.10
			8.05



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

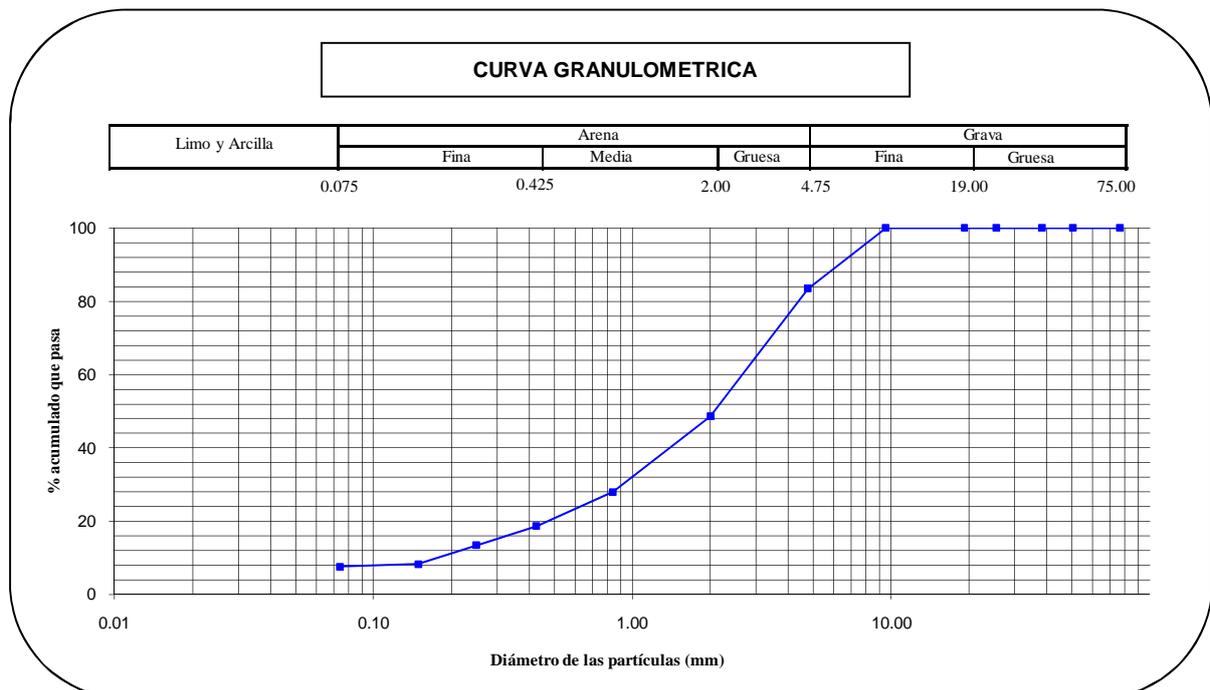
INFORME : LG-2011/0107
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-4	
Muestra		M-2	
Profundidad (m)		0,40 - 1,20	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	3"	76.200	100.00
	2"	50.300	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00
	1"	25.400	100.00
	3/4"	19.050	100.00
	3/8"	9.525	100.00
	Nº 004	4.760	83.47
	Nº 010	2.000	48.65
	Nº 020	0.840	27.92
	Nº 040	0.426	18.63
	Nº 060	0.250	13.39
	Nº 100	0.149	8.27
Nº 200	0.074	7.57	

Clasificación (S.U.C.S.)	SW - SM
Descripción :	SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel
Clasificación (AASHTO)	A-1a
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	9.16
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.18
D ₃₀ (mm)	0.92
D ₆₀ (mm)	2.65
Cu	14.95
Cc	1.78

% GRAVA	16.53	Gruesa	0.00
		Fina	16.53
% ARENA	75.90	Gruesa	34.82
		Media	30.02
		Fina	11.06
% FINOS	7.57		7.57



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

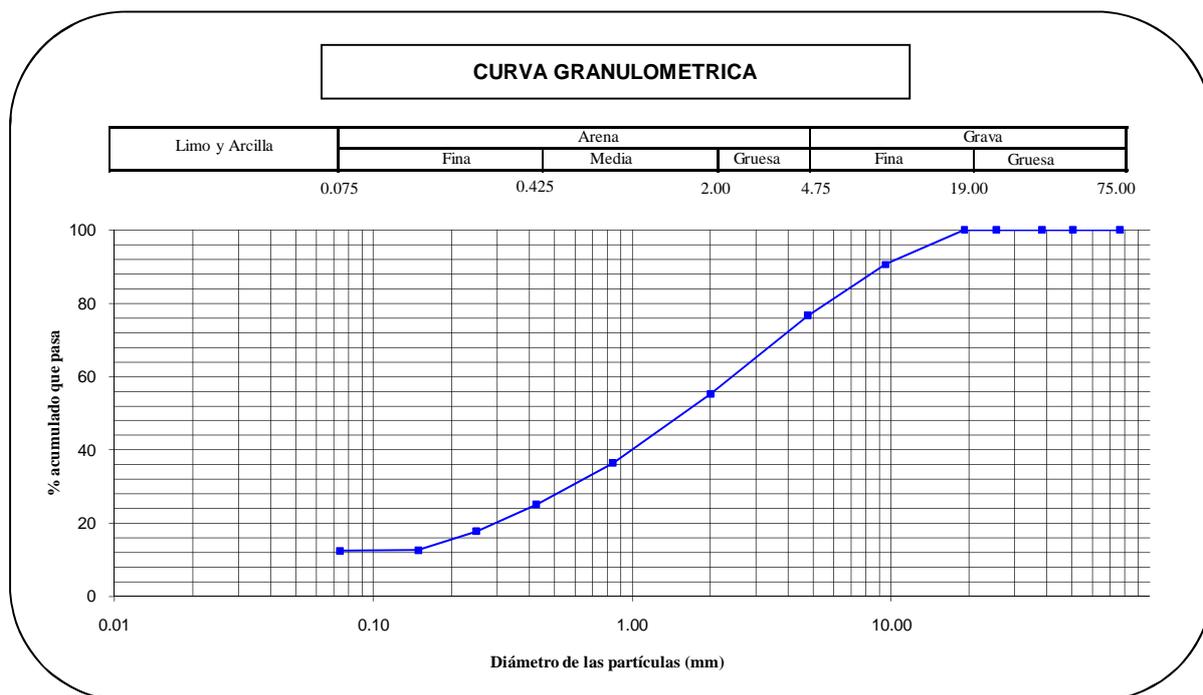
INFORME : LG-2011/0108
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-4		
Muestra		M-3		
Profundidad (m)		1,80 - 2,80		
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200	100.00
		2"	50.300	100.00
		1 1/2"	38.100	100.00
		1"	25.400	100.00
		3/4"	19.050	100.00
		3/8"	9.525	90.73
		Nº 004	4.760	76.70
		Nº 010	2.000	55.24
		Nº 020	0.840	36.38
		Nº 040	0.426	25.12
		Nº 060	0.250	17.74
Nº 100	0.149	12.64		
Nº 200	0.074	12.43		

Clasificación (S.U.C.S.)		SM
Descripción :		SM - Silty sand with gravel
Clasificación (AASHTO)		A-1b
Descripción (AASHTO)		EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad	(%)	8.81
Límite Líquido (LL)	(%)	NP
Límite Plástico (LP)	(%)	NP
Límite Contracción (LC)	(%)	NP
Indice Plástico (IP)	(%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.57
D ₆₀ (mm)	2.42
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	23.30	Gruesa	0.00
		Fina	23.30
% ARENA	64.26	Gruesa	21.45
		Media	30.12
		Fina	12.69
% FINOS	12.43		12.43



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

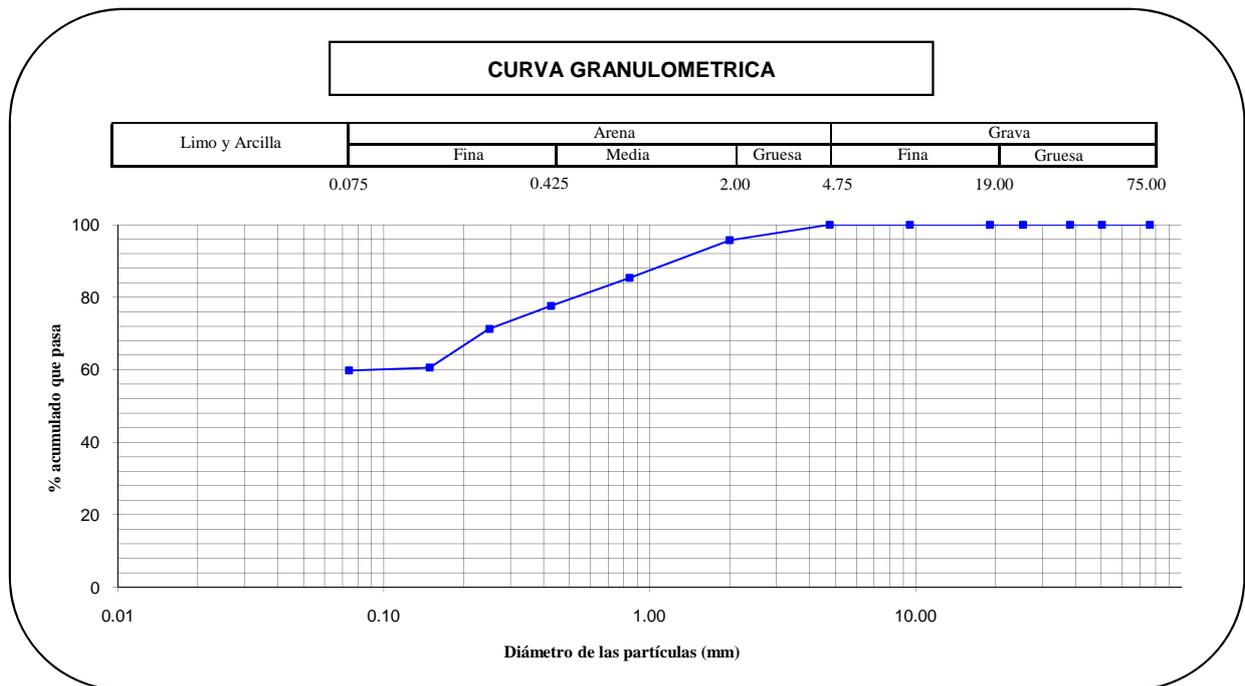
INFORME : LG-2011/0109
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-5	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,00 - 0,30	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200
		2"	50.300
		1 1/2"	38.100
		1"	25.400
		3/4"	19.050
		3/8"	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
		Nº 100	0.149
Nº 200	0.074		

Clasificación (S.U.C.S.)	ML
Descripción :	ML - Sandy silt
Clasificación (AASHTO)	A-4
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	9.16
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.09
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	40.18	Gruesa	4.28
		Media	18.09
		Fina	17.82
% FINOS	59.82		59.82



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTMD422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

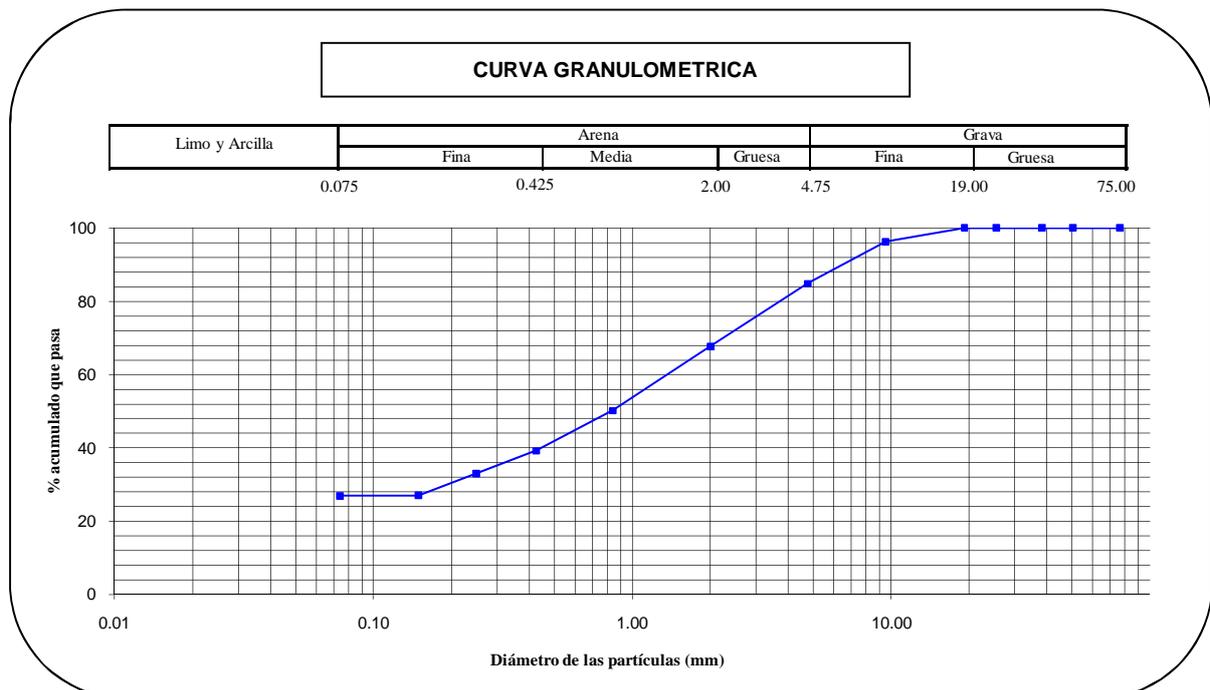
INFORME : LG-2011/0110
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-5	
Muestra		M-2	
Profundidad (m)		0,30 - 1,25	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	3 "	76.200	100.00
	2 "	50.300	100.00
	1 1/2 "	38.100	100.00
	1 "	25.400	100.00
	3/4 "	19.050	100.00
	3/8 "	9.525	96.24
	Nº 004	4.760	84.98
	Nº 010	2.000	67.67
	Nº 020	0.840	50.30
	Nº 040	0.426	39.33
	Nº 060	0.250	33.02
Nº 100	0.149	27.03	
Nº 200	0.074	26.88	

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	SM - Silty sand with gravel
Clasificación (AASHTO)	A-2-4
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	13.05
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.19
D ₆₀ (mm)	1.36
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	15.02	Gruesa	0.00
		Fina	15.02
% ARENA	58.09	Gruesa	17.30
		Media	28.34
		Fina	12.45
% FINOS	26.88		26.88



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTMD422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

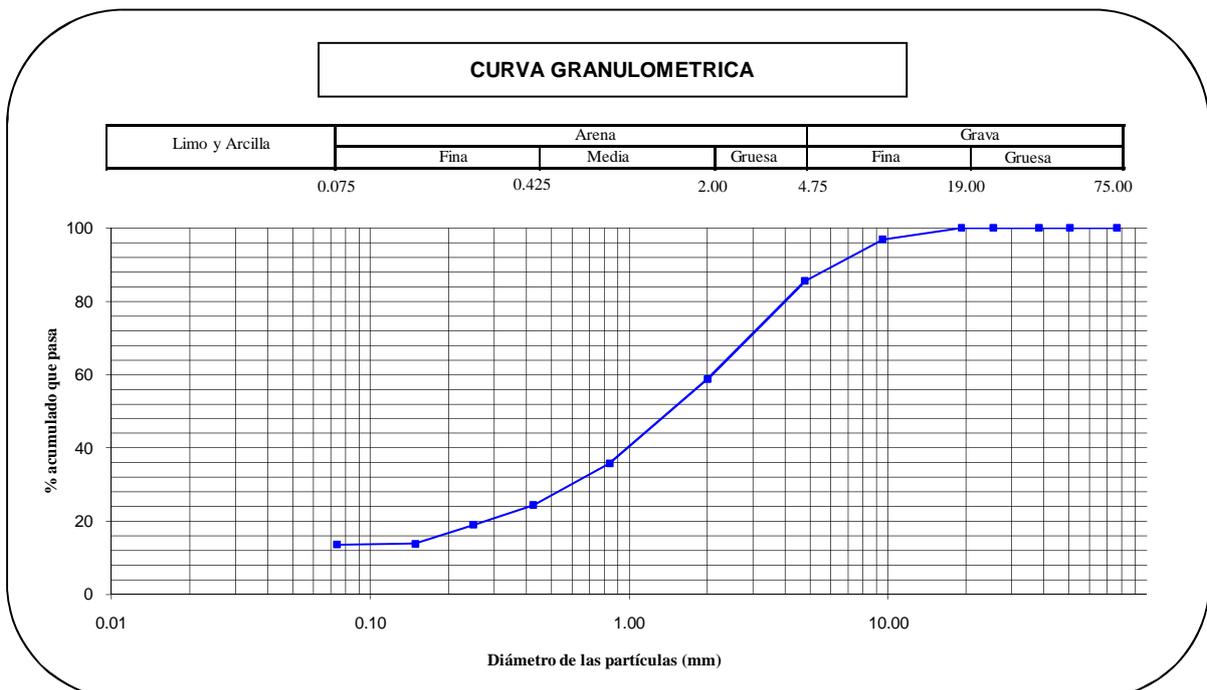
INFORME : LG-2011/0111
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-5	
Muestra		M-3	
Profundidad (m)		1,25 - 3,40	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	Porcentaje Acumulado que Pasa (%)	3"	76.200
		2"	50.300
		1 1/2"	38.100
		1"	25.400
		3/4"	19.050
		3/8"	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
	Nº 100	0.149	
	Nº 200	0.074	

Clasificación (S.U.C.S.)		SM
Descripción :		SM - Silty sand
Clasificación (AASHTO)		A-1b
Descripción (AASHTO)		EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad	(%)	7.52
Límite Líquido (LL)	(%)	NP
Límite Plástico (LP)	(%)	NP
Límite Contracción (LC)	(%)	NP
Índice Plástico (IP)	(%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.60
D ₆₀ (mm)	2.08
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	14.45	Gruesa	0.00
		Fina	14.45
% ARENA	71.95	Gruesa	26.80
		Media	34.37
		Fina	10.77
% FINOS	13.60		13.60



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

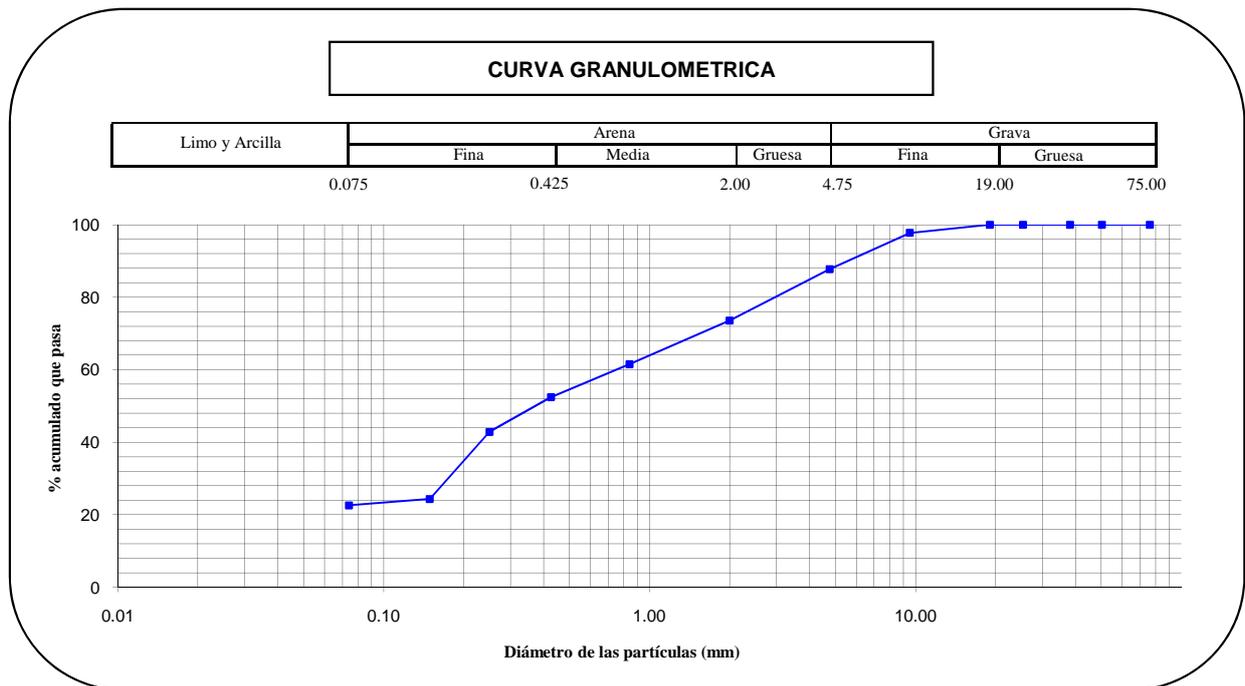
INFORME : LG-2011/0112
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-6	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,00 - 0,60	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200
		2 "	50.300
		1 1/2 "	38.100
		1 "	25.400
		3/4 "	19.050
		3/8 "	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
	Nº 100	0.149	
	Nº 200	0.074	

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	SM - Silty sand
Clasificación (AASHTO)	A-2-4
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	1.52
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.17
D ₆₀ (mm)	0.75
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	12.24	Gruesa	0.00
		Fina	12.24
% ARENA	65.17	Gruesa	14.18
		Media	21.16
		Fina	29.84
% FINOS	22.59		22.59



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

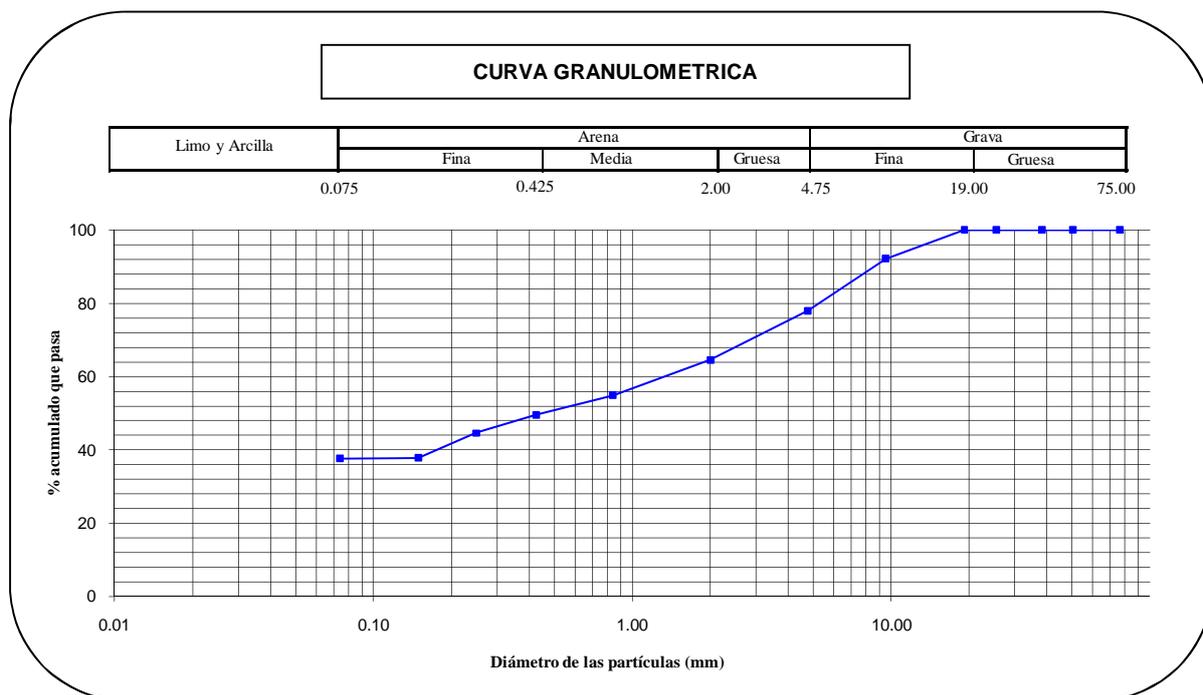
INFORME : LG-2011/0113
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-6	
Muestra		M-2	
Profundidad (m)		0,60 - 2,10	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200
		2"	50.300
		1 1/2"	38.100
		1"	25.400
		3/4"	19.050
		3/8"	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
		Nº 100	0.149
Nº 200	0.074		

Clasificación (S.U.C.S.)		SM
Descripción :		
Clasificación (AASHTO)		A-4
Descripción (AASHTO)		REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)		9.53
Límite Líquido (LL) (%)		24.21
Límite Plástico (LP) (%)		NP
Límite Contracción (LC) (%)		NP
Índice Plástico (IP) (%)		NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	1.33
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	22.06	Gruesa	0.00
		Fina	22.06
% ARENA	40.32	Gruesa	13.38
		Media	15.00
		Fina	11.94
% FINOS	37.62		37.62



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

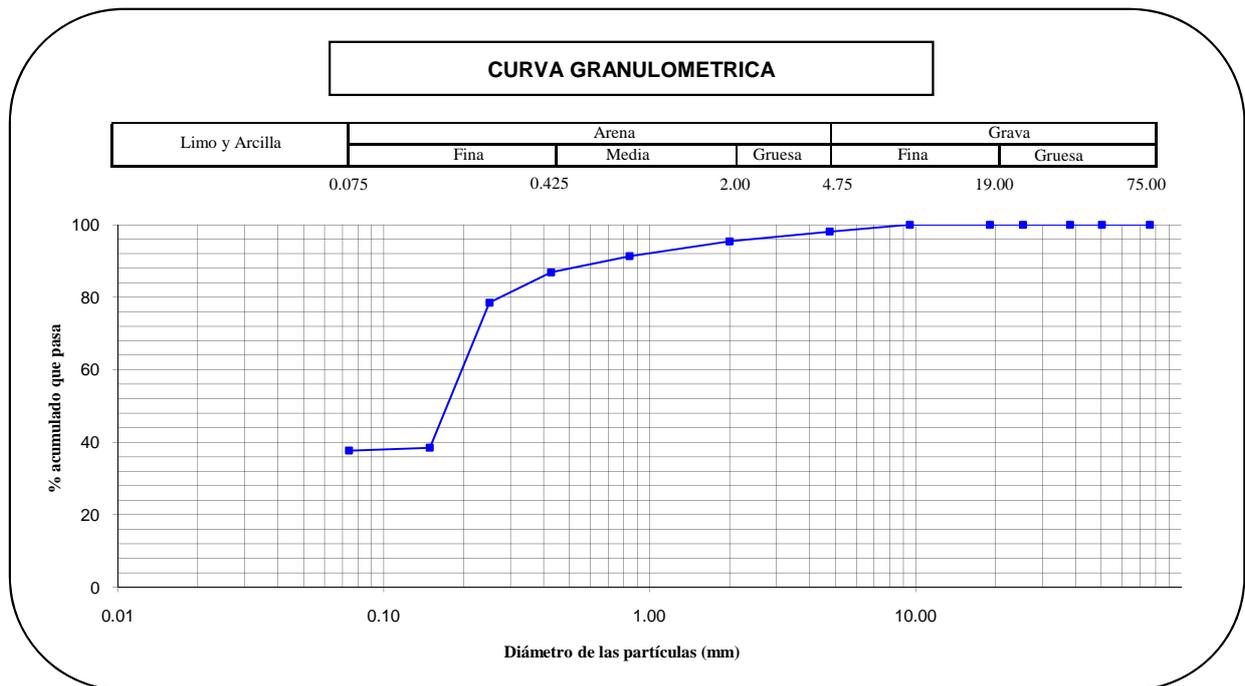
INFORME : LG-2011/0114
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-6	
Muestra		M-3	
Profundidad (m)		2,10 - 3,00	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200
		2 "	50.300
		1 1/2 "	38.100
		1 "	25.400
		3/4 "	19.050
		3/8 "	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
	Nº 100	0.149	
	Nº 200	0.074	

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	SM - Silty sand
Clasificación (AASHTO)	A-4
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	13.45
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.20
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	1.89	Gruesa	0.00
		Fina	1.89
% ARENA	60.41	Gruesa	2.69
		Media	8.55
		Fina	49.17
% FINOS	37.70		37.70



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTMD422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

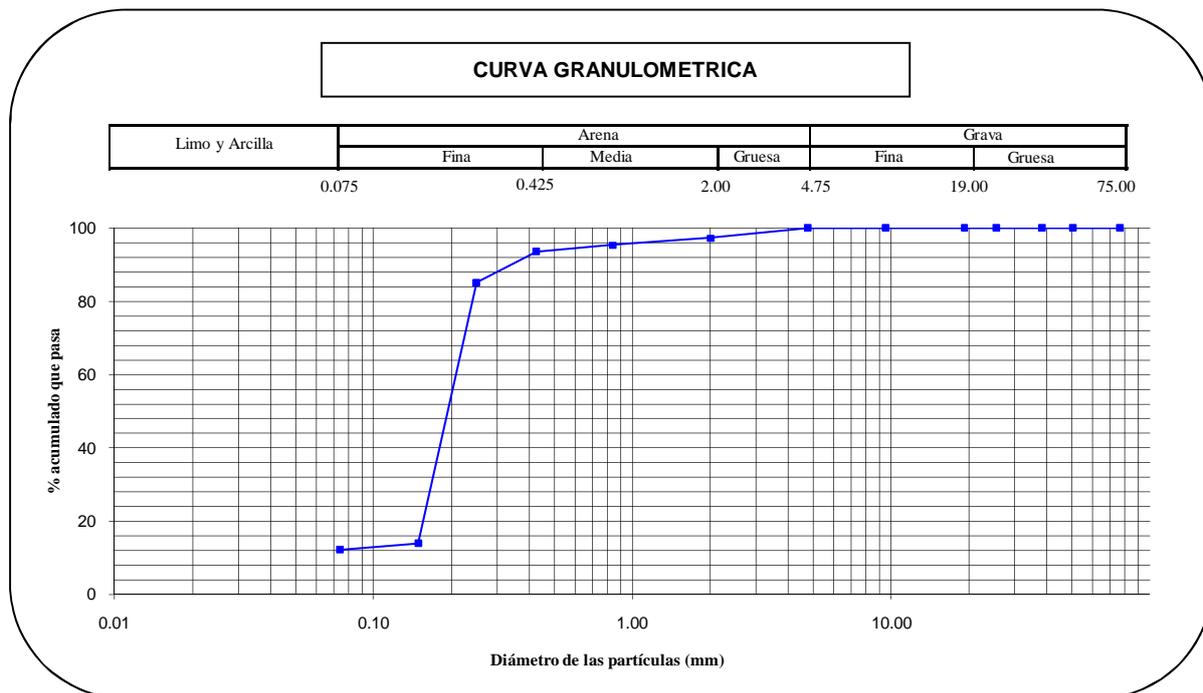
INFORME : LG-2011/0115
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-6	
Muestra		M-4	
Profundidad (m)		3,00 - 3,40	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	3"	76.200	100.00
	2"	50.300	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00
	1"	25.400	100.00
	3/4"	19.050	100.00
	3/8"	9.525	100.00
	Nº 004	4.760	100.00
	Nº 010	2.000	97.36
	Nº 020	0.840	95.43
	Nº 040	0.426	93.57
	Nº 060	0.250	85.11
Nº 100	0.149	13.90	
Nº 200	0.074	12.15	

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	SM - Silty sand
Clasificación (AASHTO)	A-2-4
Descripción (AASHTO)	EXCELENTE A BUENO
Contenido de Humedad (%)	17.53
Límite Líquido (LL) (%)	NP
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.17
D ₆₀ (mm)	0.21
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	87.85	Gruesa	2.64
		Media	3.78
		Fina	81.42
% FINOS	12.15		12.15



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

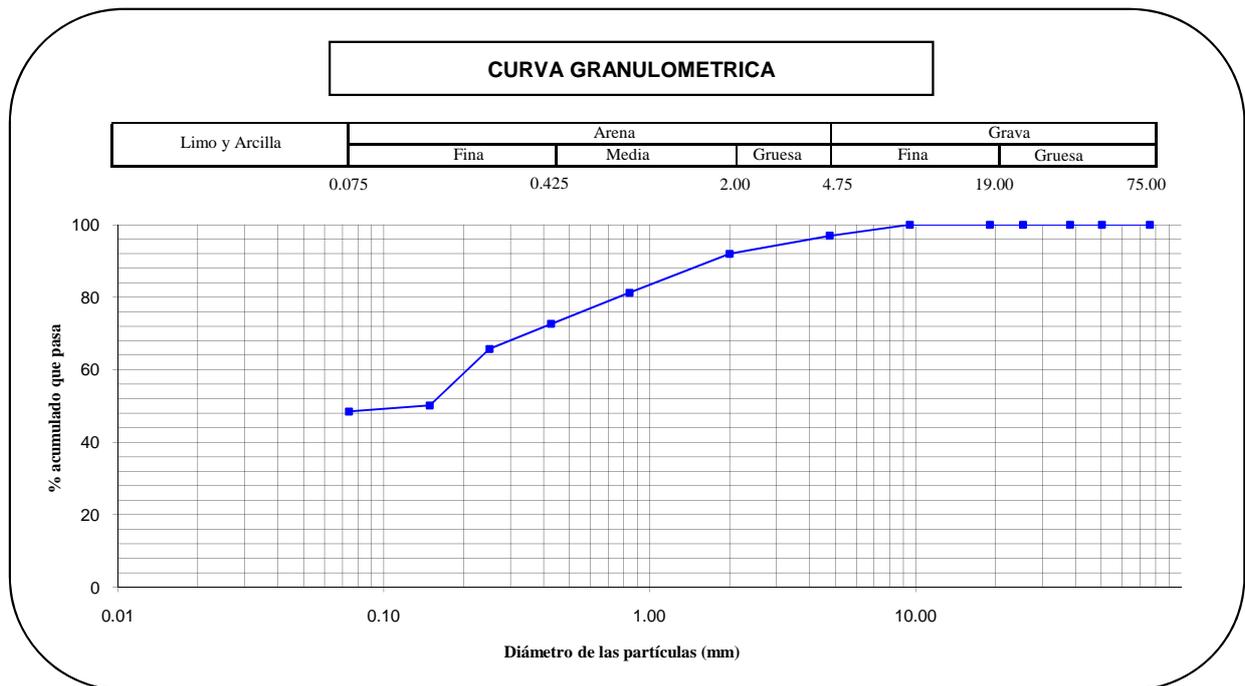
INFORME : LG-2011/0116
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-7	
Muestra		M-1	
Profundidad (m)		0,10 - 0,50	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3 "	76.200
		2 "	50.300
		1 1/2 "	38.100
		1 "	25.400
		3/4 "	19.050
		3/8 "	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
	Nº 100	0.149	
	Nº 200	0.074	

Clasificación (S.U.C.S.)	SM
Descripción :	
Clasificación (AASHTO)	A-4
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	2.25
Límite Líquido (LL) (%)	15.05
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.21
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	3.02	Gruesa	0.00
		Fina	3.02
% ARENA	48.49	Gruesa	4.99
		Media	19.31
		Fina	24.19
% FINOS	48.49		48.49



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

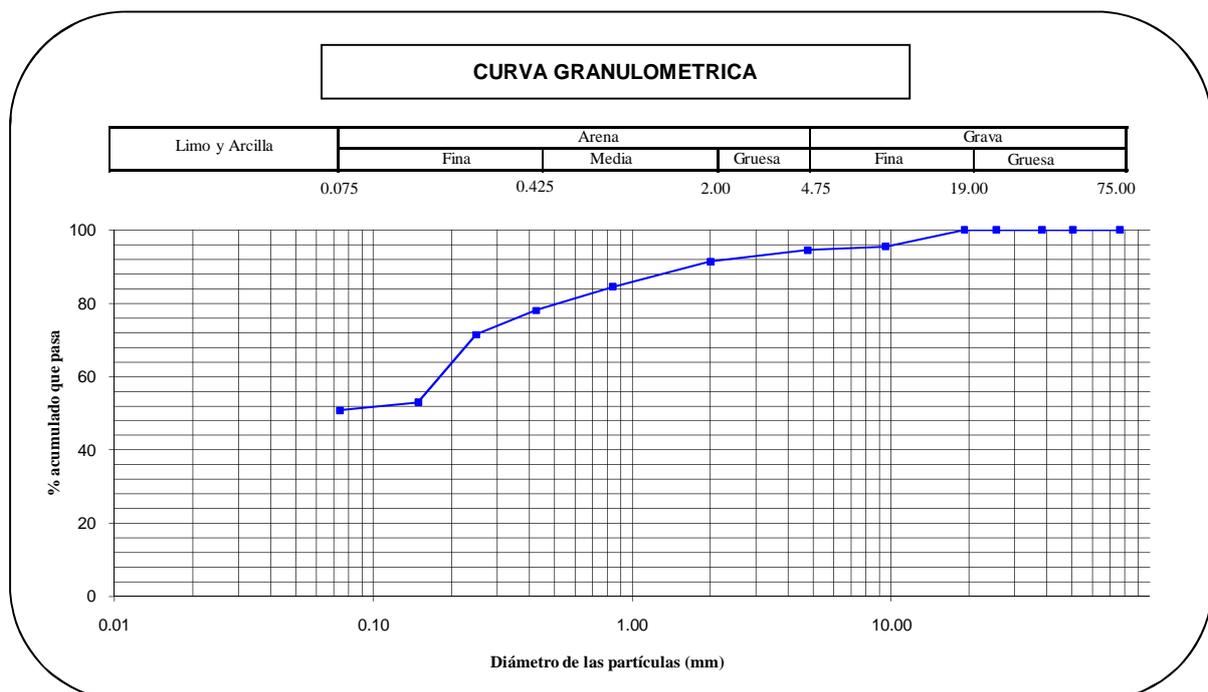
INFORME : LG-2011/0117
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-7	
Muestra		M-2	
Profundidad (m)		0,50 - 1,70	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	Porcentaje Acumulado que Pasa (%)	Tamaño (mm)	Porcentaje
	3"	76.200	100.00
	2"	50.300	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00
	1"	25.400	100.00
	3/4"	19.050	100.00
	3/8"	9.525	95.48
	Nº 004	4.760	94.52
	Nº 010	2.000	91.39
	Nº 020	0.840	84.49
	Nº 040	0.426	78.18
	Nº 060	0.250	71.56
Nº 100	0.149	52.94	
Nº 200	0.074	50.79	

Clasificación (S.U.C.S.)		ML
Descripción :		
Clasificación (AASHTO)		A-4
Descripción (AASHTO)		REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)		8.73
Límite Líquido (LL) (%)		24.80
Límite Plástico (LP) (%)		NP
Límite Contracción (LC) (%)		NP
Índice Plástico (IP) (%)		NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.18
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	5.48	Gruesa	0.00
		Fina	5.48
% ARENA	43.72	Gruesa	3.12
		Media	13.21
		Fina	27.39
% FINOS	50.79		50.79



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

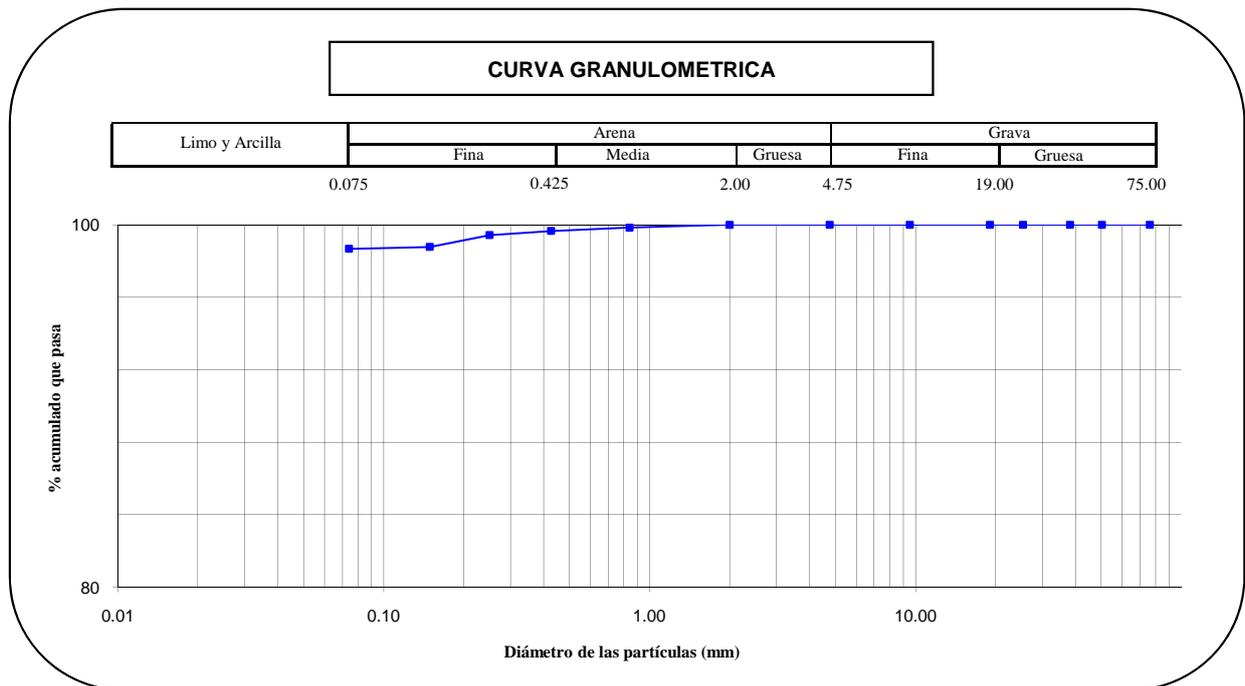
INFORME : LG-2011/0118
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-7	
Muestra		M-3	
Profundidad (m)		1,70 - 2,00	
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200
		2"	50.300
		1 1/2"	38.100
		1"	25.400
		3/4"	19.050
		3/8"	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
Nº 100	0.149		
Nº 200	0.074		

Clasificación (S.U.C.S.)	MH
Descripción :	
Clasificación (AASHTO)	A-5
Descripción (AASHTO)	REGULAR A MALO
Contenido de Humedad (%)	23.93
Límite Líquido (LL) (%)	50.81
Límite Plástico (LP) (%)	NP
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	NP

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	1.33	Gruesa	0.00
		Media	0.34
		Fina	0.98
% FINOS	98.67		98.67



LABORATORIO GEOTÉCNICO

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION
(ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)**

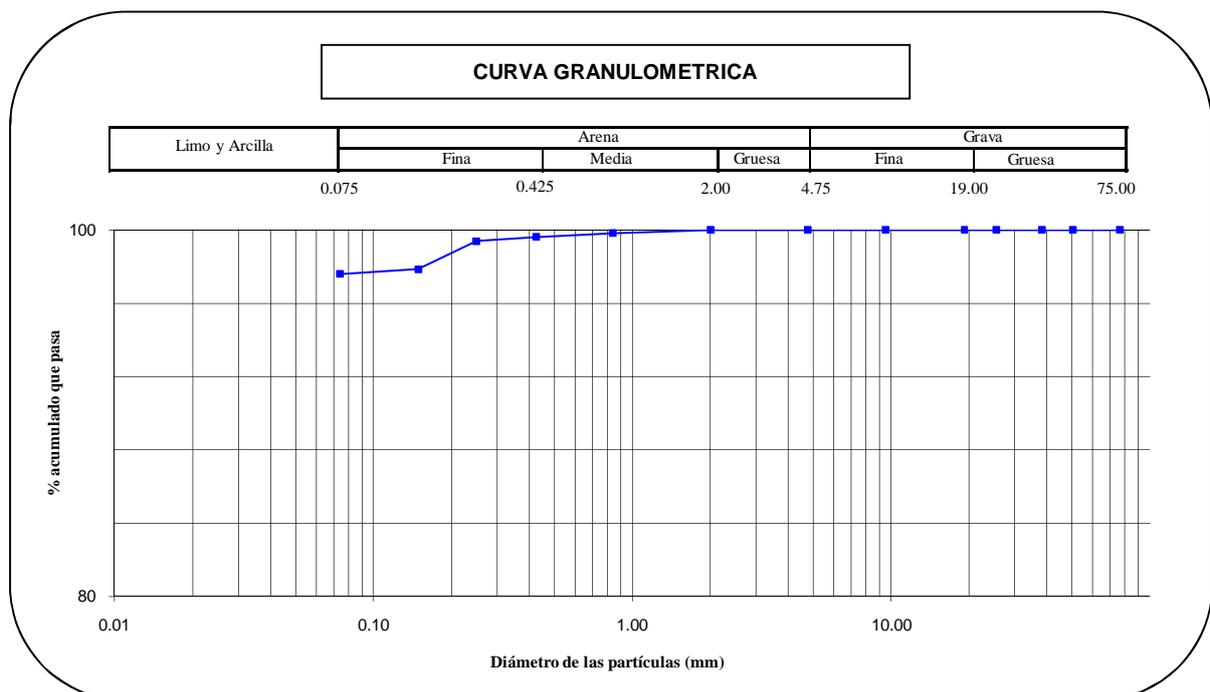
INFORME : LG-2011/0119
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-7	
Muestra		M-4	
Profundidad (m)		2,00 - 3,15	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200
		2"	50.300
		1 1/2"	38.100
		1"	25.400
		3/4"	19.050
		3/8"	9.525
		Nº 004	4.760
		Nº 010	2.000
		Nº 020	0.840
		Nº 040	0.426
		Nº 060	0.250
	Nº 100	0.149	
	Nº 200	0.074	

Clasificación (S.U.C.S.)		MH
Descripción :		MH - Elastic silt
Clasificación (AASHTO)		A-7-5
Descripción (AASHTO)		MALO
Contenido de Humedad	(%)	24.60
Límite Líquido (LL)	(%)	50.99
Límite Plástico (LP)	(%)	37.87
Límite Contracción (LC)	(%)	NP
Índice Plástico (IP)	(%)	13.13

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	2.40	Gruesa	0.00
		Media	0.38
		Fina	2.02
% FINOS	97.60		97.60



LABORATORIO GEOTÉCNICO

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (ASTM D422 - D2216 - D854 - D4318 - D427 - D3282 - D2487)

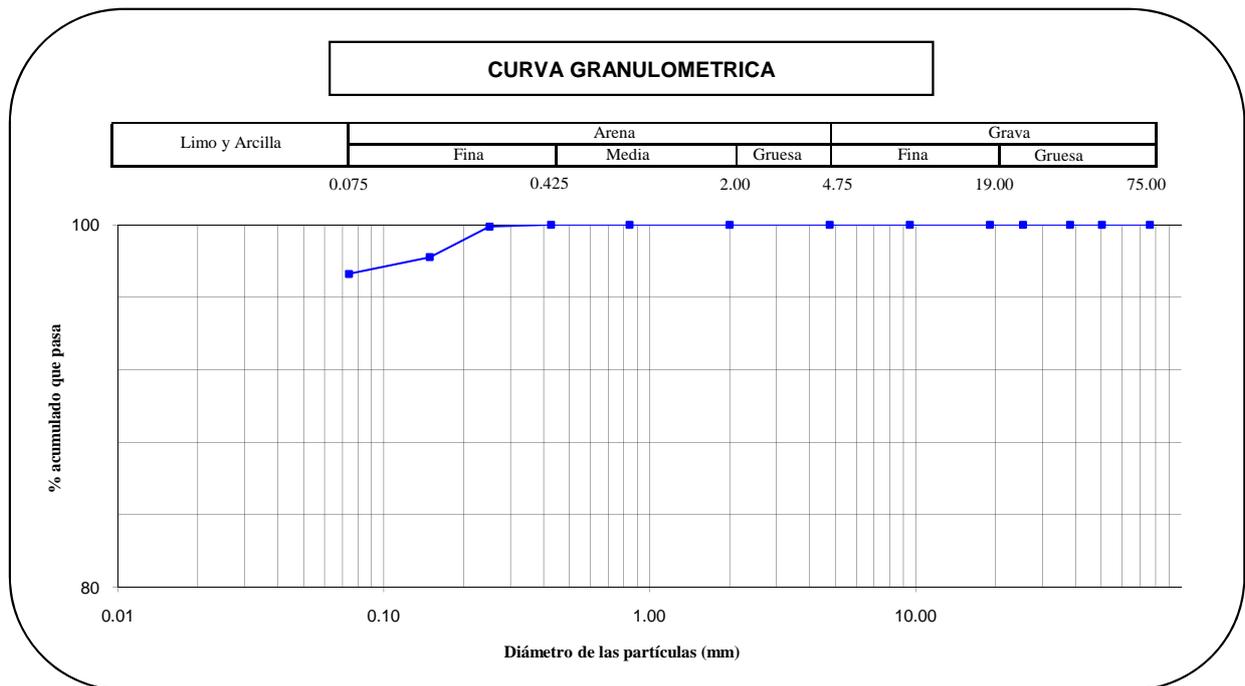
INFORME : LG-2011/0120
SOLICITANTE : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
UBICACION : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
FECHA : Feb-2011

Sondaje		Calicata C-7		
Muestra		M-5		
Profundidad (m)		3,15 - 3,80		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	3"	76.200	100.00
		2"	50.300	100.00
		1 1/2"	38.100	100.00
		1"	25.400	100.00
		3/4"	19.050	100.00
		3/8"	9.525	100.00
		Nº 004	4.760	100.00
		Nº 010	2.000	100.00
		Nº 020	0.840	100.00
		Nº 040	0.426	100.00
		Nº 060	0.250	99.89
Nº 100	0.149	98.21		
Nº 200	0.074	97.29		

Clasificación (S.U.C.S.)	MH
Descripción :	MH - Elastic silt
Clasificación (AASHTO)	A-7-5
Descripción (AASHTO)	MALO
Contenido de Humedad (%)	66.64
Límite Líquido (LL) (%)	87.21
Límite Plástico (LP) (%)	42.52
Límite Contracción (LC) (%)	NP
Índice Plástico (IP) (%)	44.69

D ₁₀ (mm)	0.00
D ₃₀ (mm)	0.00
D ₆₀ (mm)	0.00
Cu	0.00
Cc	0.00

% GRAVA	0.00	Gruesa	0.00
		Fina	0.00
% ARENA	2.71	Gruesa	0.00
		Media	0.00
		Fina	2.71
% FINOS	97.29		97.29



LABORATORIO GEOTECNICO

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)

INFORME : LG-2011/0101
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.20 - 0.70
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	3
N° de frasco	6	5	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	97.77	85.45	
Peso de frasco Vol. (gr.)	67.77	55.45	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	185.47	173.10	
Peso del f + P del agua	167.47	155.16	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.50	2.49	
		2.49	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)

INFORME : LG-2011/0102
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 0.70 - 1.40
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	9	8	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	81.85	73.26	
Peso de frasco Vol. (gr.)	51.85	43.26	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	169.49	160.80	
Peso del f + P del agua	151.72	142.94	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.45	2.47	
	2.46		

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)

INFORME : LG-2011/0103
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 4: Sechura - Piura
CALICATA : C-1
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.40 - 4.00
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	5	6	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	85.45	97.77	
Peso de frasco Vol. (gr.)	55.45	67.77	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	172.75	185.00	
Peso del f + P del agua	155.16	167.47	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.42	2.41	
	2.41		

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)

INFORME : LG-2011/0104
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 5: Sechura - Piura
CALICATA : C-3
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.80 - 1.40
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	8	9	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	73.26	81.85	
Peso de frasco Vol. (gr.)	43.26	51.85	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	159.90	168.80	
Peso del f + P del agua	142.94	151.72	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.30	2.32	
	2.31		

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0105
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 5: Sechura - Piura
CALICATA : C-3
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 2.50 - 2.80
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	8	9	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	73.26	81.85	
Peso de frasco Vol. (gr.)	43.26	51.85	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	161.23	170.02	
Peso del f + P del agua	142.94	151.72	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.56	2.56	
	2.56		

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0106
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
CALICATA : C-4
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.10 - 0.40
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	9	8	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	81.85	73.26	
Peso de frasco Vol. (gr.)	51.85	43.26	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	170.80	161.98	
Peso del f + P del agua	151.72	142.94	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.75	2.74	
		2.74	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0107
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
CALICATA : C-4
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 0.40 - 1.20
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	5	6	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	85.45	97.77	
Peso de frasco Vol. (gr.)	55.45	67.77	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	172.78	185.00	
Peso del f + P del agua	155.16	167.47	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.42	2.41	
		2.41	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0108
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 6: Sechura - Piura
CALICATA : C-4
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.80 - 2.80
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	6	5	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	97.77	85.45	
Peso de frasco Vol. (gr.)	67.77	55.45	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	184.77	172.58	
Peso del f + P del agua	167.47	155.16	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.36	2.38	
	2.37		

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0109
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
CALICATA : C-5
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.30
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	8	9	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	73.26	81.85	
Peso de frasco Vol. (gr.)	43.26	51.85	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	160.26	169.05	
Peso del f + P del agua	142.94	151.72	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.37	2.37	
		2.37	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0110
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
CALICATA : C-5
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 0.30 - 1.25
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	9	8	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	81.85	73.26	
Peso de frasco Vol. (gr.)	51.85	43.26	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	168.67	160.00	
Peso del f + P del agua	151.72	142.94	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.30	2.32	
		2.31	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0111
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 1: Sechura - Piura
CALICATA : C-5
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.25 - 3.40
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	5	6	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	85.45	97.47	
Peso de frasco Vol. (gr.)	55.45	67.47	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	172.60	185.01	
Peso del f + P del agua	155.16	167.47	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.39	2.41	
		2.40	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0112
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
CALICATA : C-6
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.00 - 0.60
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	6	5	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	97.47	85.45	
Peso de frasco Vol. (gr.)	67.47	55.45	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	184.46	172.25	
Peso del f + P del agua	167.47	155.16	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.31	2.32	
	2.31		

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0113
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
CALICATA : C-6
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 0.60 - 2.10
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	8	9	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	73.26	81.85	
Peso de frasco Vol. (gr.)	43.26	51.85	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	160.66	169.51	
Peso del f + P del agua	142.94	151.72	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.44	2.46	
		2.45	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0114
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
CALICATA : C-6
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 2.10 - 3.00
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	9	8	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	81.85	73.26	
Peso de frasco Vol. (gr.)	51.85	43.26	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	169.65	160.87	
Peso del f + P del agua	151.72	142.94	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.49	2.49	
		2.49	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0115
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 2: Sechura - Piura
CALICATA : C-6
MUESTRA : M-4
PROFUNDIDAD : 3.00 - 3.40
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	5	6	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	85.45	97.47	
Peso de frasco Vol. (gr.)	55.45	67.47	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	172.40	184.79	
Peso del f + P del agua	155.16	167.47	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.35	2.37	
		2.36	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0116
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
CALICATA : C-7
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.10 - 0.50
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	6	5	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	97.47	85.45	
Peso de frasco Vol. (gr.)	67.47	55.45	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	184.65	172.40	
Peso del f + P del agua	167.47	155.16	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.34	2.35	
		2.35	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0117
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAHNS PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
CALICATA : C-7
MUESTRA : M-2
PROFUNDIDAD : 0.50 - 1.70
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	8	9	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	73.26	81.85	
Peso de frasco Vol. (gr.)	43.26	51.85	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	161.40	170.10	
Peso del f + P del agua	142.94	151.72	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.60	2.58	
	2.59		

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0118
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
CALICATA : C-7
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.70 - 2.00
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	9	8	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	81.85	73.26	
Peso de frasco Vol. (gr.)	51.85	43.26	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	168.63	159.90	
Peso del f + P del agua	151.72	142.94	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.29	2.30	
		2.30	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0119
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
CALICATA : C-7
MUESTRA : M-4
PROFUNDIDAD : 2.00 - 3.15
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	5	6	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	85.45	97.47	
Peso de frasco Vol. (gr.)	55.45	67.47	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	172.29	184.60	
Peso del f + P del agua	155.16	167.47	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.33	2.33	
		2.33	

LABORATORIO GEOTECNICO

**PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS
(ASTM D 854-98)**

INFORME : LG-2011/0120
PROYECTO : Evaluación de Filtraciones para Lagunas de Salmuera
SOLICITADO : AMERICAS POTAH S PERU S.A.
UBICACIÓN : Unidad de Producción N° 3: Sechura - Piura
CALICATA : C-7
MUESTRA : M-5
PROFUNDIDAD : 3.15 - 3.80
FECHA : Feb-2011

N° de Muestra	1	2	
N° de frasco	6	5	
Peso de F. Vol. + Peso S.S. (gr.)	97.47	85.45	
Peso de frasco Vol. (gr.)	67.47	55.45	
Peso del suelo seco (gr.)	30.00	30.00	
Peso del f + P del S.S. + P.de agua	183.44	171.20	
Peso del f + P del agua	167.47	155.16	
Peso Esp. Relativo de Sólidos	2.14	2.15	
	2.14		

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0101
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : SECHURA - PIURA -UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 4
SONDAJE : Calicata C-1
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.40 - 4.00
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen		1	2	
Peso del Anillo (gr)		51.58	51.58	
Volumen del Anillo (cm ³)		56.55	56.55	
Peso de la muestra + Anillo (gr)		147.58	146.81	
Peso de la muestra (gr)		96.00	95.23	
Densidad de la muestra Húmeda (gr/cm ³)		1.70	1.68	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)			1.69	
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)			1.25	

Contenido de Humedad				
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)		631.69		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)		520.36		
Peso de la Tara (gr)		209.30		
Peso del Agua (gr)		111.33		
Peso del Suelo Seco (gr)		311.06		
Contenido de Humedad (%)		35.79		
Contenido de Humedad Promedio (%)			35.79	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0102
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 5 : SECHURA - PIURA
SONDAJE : Calicata C-3
MUESTRA : M-1
PROFUNDIDAD : 0.80 - 1.40
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen	1	2	
Densidad de la Parafina (gr/cm ³)	0.87	0.87	
Peso de la muestra (gr)	30.28	34.56	
Peso de la muestra + Parafina (gr)	33.00	37.75	
Volumen muestra + Parafina (cm ³)	24.00	27.00	
Densidad de la muestra Húmedoa (gr/cm ³)	1.45	1.48	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)		1.47	
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)		1.12	

Contenido de Humedad			
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)	595.63		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)	501.27		
Peso de la Tara (gr)	193.60		
Peso del Agua (gr)	94.36		
Peso del Suelo Seco (gr)	307.67		
Contenido de Humedad (%)	30.67		
Contenido de Humedad Promedio (%)		30.67	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0102
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 2 : SECHURA - PIURA
SONDAJE : Calicata C-6
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 2.10 - 3.00
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen	1	2	
Densidad de la Parafina (gr/cm ³)	0.87	0.87	
Peso de la muestra (gr)	88.32	137.21	
Peso de la muestra + Parafina (gr)	93.31	143.29	
Volumen muestra + Parafina (cm ³)	50.00	75.00	
Densidad de la muestra Húmedoa (gr/cm ³)	2.00	2.02	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)		2.01	
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)		1.77	

Contenido de Humedad			
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)	782.80		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)	701.17		
Peso de la Tara (gr)	94.12		
Peso del Agua (gr)	81.63		
Peso del Suelo Seco (gr)	607.05		
Contenido de Humedad (%)	13.45		
Contenido de Humedad Promedio (%)		13.45	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0102
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 3 : SECHURA - PIURA
SONDAJE : Calicata C-7
MUESTRA : M-3
PROFUNDIDAD : 1.70 - 2.00
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen	1	2	
Densidad de la Parafina (gr/cm ³)	0.87	0.87	
Peso de la muestra (gr)	46.41	30.23	
Peso de la muestra + Parafina (gr)	50.45	32.94	
Volumen muestra + Parafina (cm ³)	35.00	23.00	
Densidad de la muestra Húmedoa (gr/cm ³)	1.53	1.52	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)		1.52	
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)		1.23	

Contenido de Humedad			
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)	602.12		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)	501.19		
Peso de la Tara (gr)	79.41		
Peso del Agua (gr)	100.93		
Peso del Suelo Seco (gr)	421.78		
Contenido de Humedad (%)	23.93		
Contenido de Humedad Promedio (%)		23.93	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0102
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 3 : SECHURA - PIURA
SONDAJE : Calicata C-7
MUESTRA : M-4
PROFUNDIDAD : 2.00 - 3.15
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen	1	2	
Densidad de la Parafina (gr/cm ³)	0.87	0.87	
Peso de la muestra (gr)	57.82	65.60	
Peso de la muestra + Parafina (gr)	61.92	70.33	
Volumen muestra + Parafina (cm ³)	43.00	48.00	
Densidad de la muestra Húmedoa (gr/cm ³)	1.51	1.54	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)		1.53	
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)		1.22	

Contenido de Humedad			
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)	852.75		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)	718.32		
Peso de la Tara (gr)	171.84		
Peso del Agua (gr)	134.43		
Peso del Suelo Seco (gr)	546.48		
Contenido de Humedad (%)	24.60		
Contenido de Humedad Promedio (%)		24.60	

LABORATORIO GEOTECNICO

PESO VOLUMETRICO

INFORME : LG-2011/0101
PROYECTO : EVALUACIÓN DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERA
SOLICITANTE : AMERICAS POTASH PERÚ S.A
UBICACIÓN : UNIDAD DE PRODUCCIÓN N° 3 : SECHURA - PIURA
SONDAJE : Calicata C-7
MUESTRA : M-5
PROFUNDIDAD : 3.15 - 3.80
FECHA : Feb-2011

N° del espécimen		1	2	
Peso del Anillo (gr)		51.58	51.58	
Volumen del Anillo (cm ³)		56.55	56.55	
Peso de la muestra + Anillo (gr)		133.94	134.83	
Peso de la muestra (gr)		82.36	83.25	
Densidad de la muestra Húmeda (gr/cm ³)		1.46	1.47	
Densidad Húmeda Promedio (gr/cm ³)		1.46		
Densidad Seca Promedio (gr/cm ³)		0.88		

Contenido de Humedad				
Peso del Suelo Húmedo+Tara (gr)		714.36		
Peso del Suelo Seco+Tara (gr)		493.30		
Peso de la Tara (gr)		161.57		
Peso del Agua (gr)		221.06		
Peso del Suelo Seco (gr)		331.73		
Contenido de Humedad (%)		66.64		
Contenido de Humedad Promedio (%)		66.64		



ENSAYOS DE CARACTERIZACIONES FÍSICAS

(ASTM - D4426; D422; D4318; D427; D2487; D-3282)

Informe : LG11-061
Solicitante : JORGE E. ALVA HURTADO INGENIEROS E.I.R.L.
Proyecto : Evaluación de Filtraciones para las Lagunas de Salmueras

Fecha : Marzo, 2011

Ubicación : Bayovar, Piura

Sondaje : C - 1
Muestra : ---
Profundidad (m) : 2.00

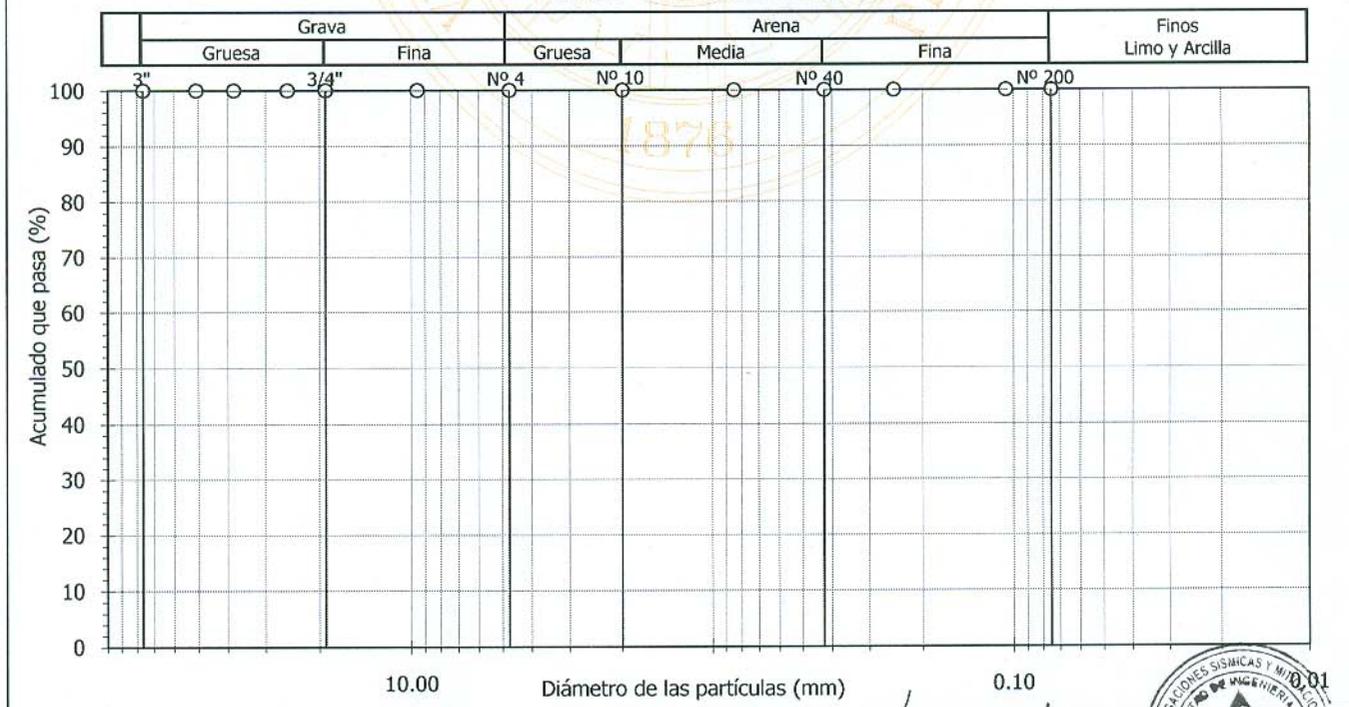
Hoja : 1 de 1

Granulometría por tamizado		
Tamiz	Abertura (mm)	Acum. q' Pasa (%)
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1½"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
¾"	19.050	100.0
3/8"	9.525	100.0
Nº 4	4.750	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.850	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	100.0
Nº 140	0.106	100.0
Nº 200	0.075	100.0

Contenido de humedad		(%)	36.8
Límites de consistencia	Límite Líquido	(%)	70
	Límite Plástico	(%)	28
	Índice de Plasticidad	(%)	42
	Límite de Contracción	(%)	---
Resultados de granulometría por tamizado	Coeficiente de Uniformidad (Cu)		---
	Coeficiente de Curvatura (Cc)		---
	Grava [Nº 4 < ϕ < 3"]	(%)	0.0
	Arena [Nº 200 < ϕ < Nº 4]	(%)	0.0
	Finos [ϕ < Nº 200]	(%)	100.0

Clasificación	
AASHTO	SUCS
A-7-6 (50)	CH Arcilla gruesa

CURVA GRANULOMETRICA



Observación : La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

DAVID LUNA DURAN
 INGENIERO CIVIL - OIP. 43988
 JEFE DEL LAB. GEOTECNICO





PERMEABILIDAD
(Pared Flexible ASTM - D5084)

Informe : LG11-061
Solicitante : JORGE E. ALVA HURTADO INGENIEROS E.I.R.L.
Proyecto : Evaluación de Filtraciones para las Lagunas de Salmueras

Fecha : Marzo, 2011

Ubicación : Bayovar, Piura

Sondaje : C - 1
Muestra : ---
Prof. (m) : 2.00
Estado : Inalterado

AASHTO : A-7-6 (50)
SUCS : CH / Arcilla gruesa
Hoja : 1 de 1

Datos del espécimen

Diámetro : 4.83 cm	Humedad inicial : 36.7 %
Altura : 10.1 cm	Humedad final : 40.4 %
Densidad seca : 1.24 g/cm ³	Saturación inicial : 88.7 %
Gravedad de sólidos : 2.56	Saturación final : 97.7 %

Cálculo de parámetro "B"

Presión de celda
Inicial : 3.55 kg/cm³
Final : 3.76 kg/cm³

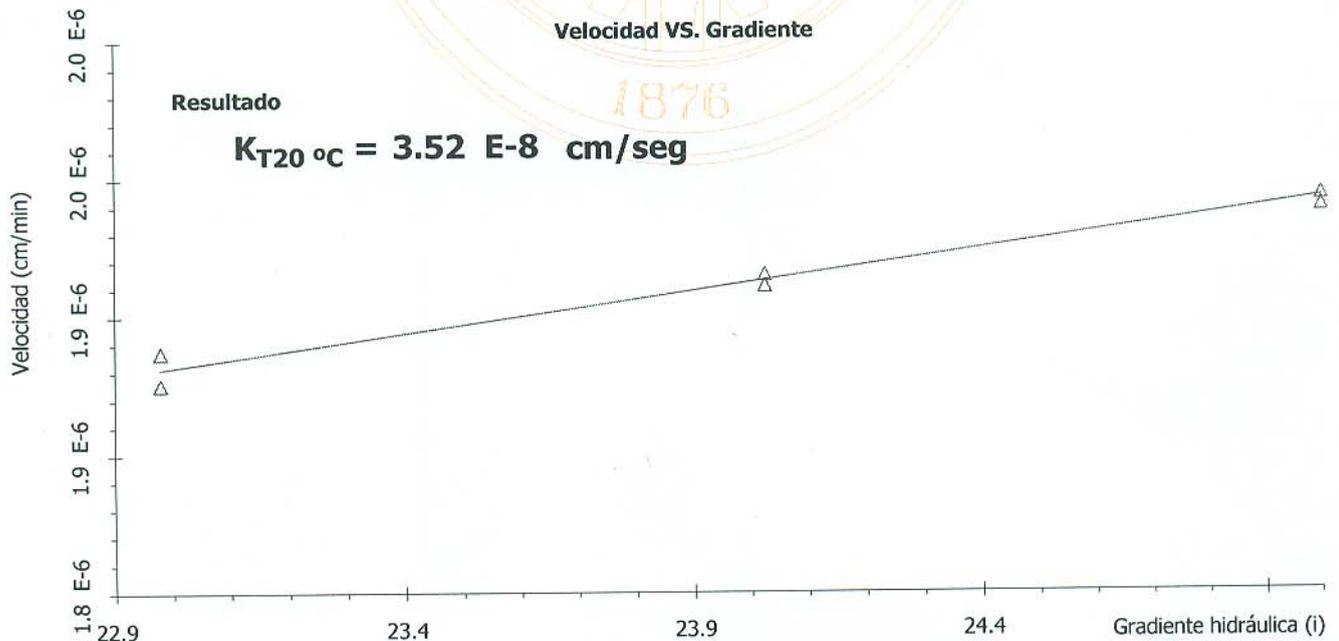
Presión de poros
Inicial : 3.42 kg/cm³
Final : 3.62 kg/cm³

Contrapresión
Inicial : 3.42 kg/cm³
Final : 3.62 kg/cm³

Parám. "B" : 96.7 %

Cálculo de conductividad hidráulica

P. Entrada (kg/cm ²)	Tiempo (seg)	Volumen (cm ³)	Temp. (°C)	Gradiente (i)	Velocidad (cm/seg)	K _{T20 °C} (cm/seg)
3.85	29100	1.00	26.0	23.0	1.88 E-6	7.08 E-8
3.85	28920	1.00	26.0	23.0	1.89 E-6	7.12 E-8
3.86	28560	1.00	26.0	24.0	1.91 E-6	6.90 E-8
3.86	28500	1.00	26.0	24.0	1.92 E-6	6.91 E-8
3.87	28140	1.00	26.0	25.0	1.94 E-6	6.73 E-8
3.87	28080	1.00	26.0	25.0	1.94 E-6	6.74 E-8



Observación :

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

DAVID LUNA DURAN
 INGENIERO CIVIL - CIP. 43988
 JEFE DEL LAB. GEOTECNICO





ENSAYOS DE CARACTERIZACIONES FISICAS

(ASTM - D4426; D422; D4318; D427; D2487; D-3282)

Informe : LG11-061
Solicitante : JORGE E. ALVA HURTADO INGENIEROS E.I.R.L.
Proyecto : Evaluación de Filtraciones para las Lagunas de Salmueras

Fecha : Marzo, 2011

Ubicación : Bayovar, Piura

Sondaje : C - 7
Muestra : ---
Profundidad (m) : 3.80 - 4.00

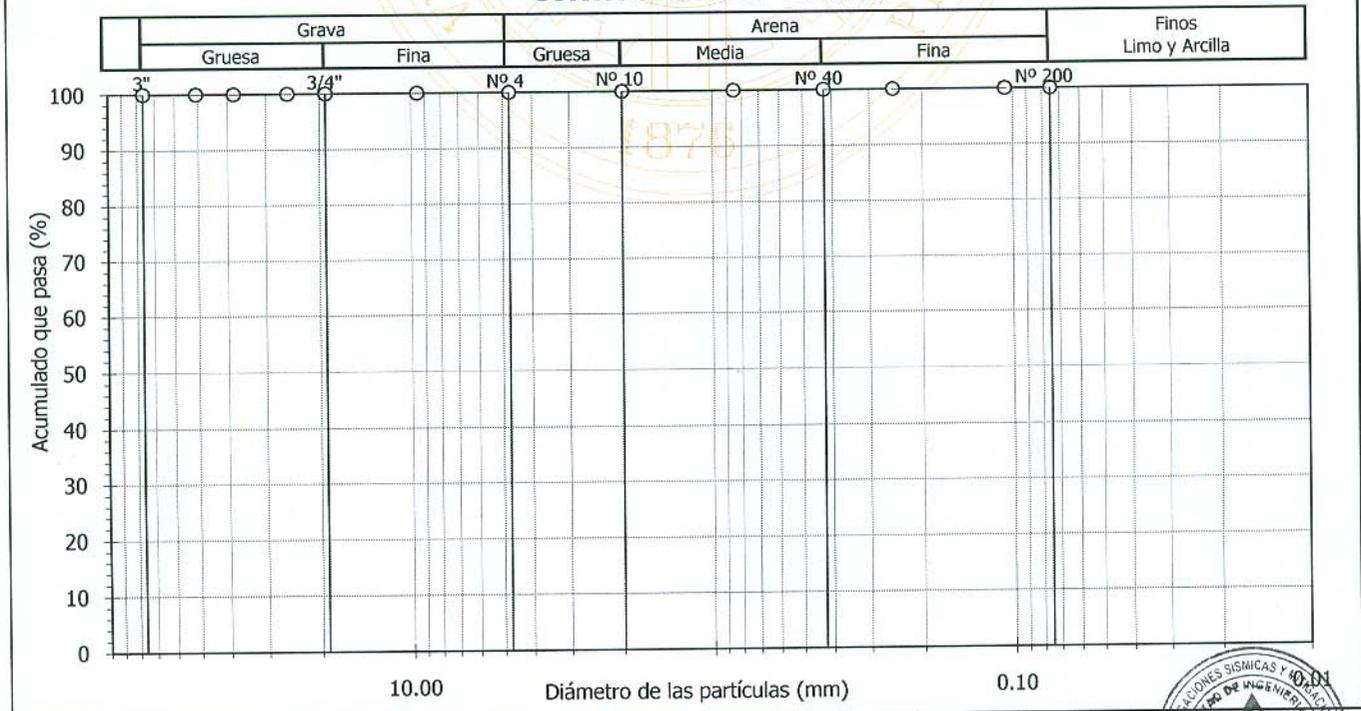
Hoja : 1 de 1

Granulometría por tamizado		
Tamiz	Abertura (mm)	Acum. q' Pasa (%)
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1½"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
¾"	19.050	100.0
3/8"	9.525	100.0
Nº 4	4.750	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.850	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	100.0
Nº 140	0.106	100.0
Nº 200	0.075	100.0

Contenido de humedad		(%)	61.4
Límites de consistencia	Límite Líquido	(%)	103
	Límite Plástico	(%)	51
	Índice de Plasticidad	(%)	52
	Límite de Contracción	(%)	---
Resultados de granulometría por tamizado	Coeficiente de Uniformidad (Cu)		---
	Coeficiente de Curvatura (Cc)		---
	Grava [N° 4 < ϕ < 3"]	(%)	0.0
	Arena [N° 200 < ϕ < N° 4]	(%)	0.0
	Finos [ϕ < N° 200]	(%)	100.0

Clasificación	
AASHTO	SUCS
A-7-5 (69)	MH Limo elástico

CURVA GRANULOMETRICA



Observación : La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

David Luna Duran
DAVID LUNA DURAN
INGENIERO CIVIL - CIP. 48989
JEFE DEL LAB. GEOTECNICO





PERMEABILIDAD
(Pared Flexible ASTM - D5084)

Fecha : Marzo, 2011

Informe : LG11-061
 Solicitante : JORGE E. ALVA HURTADO INGENIEROS E.I.R.L.
 Proyecto : Evaluación de Filtraciones para las Lagunas de Salmueras

Ubicación : Bayovar, Piura

Sondaje : C - 7
 Muestra : ---
 Prof. (m) : 3.80 - 4.00
 Estado : Inalterado

AASHTO : A-7-5 (59)
 SUCS : MH / Limo elástico
 Hoja : 1 de 1

Datos del espécimen

Diámetro : 4.9 cm
 Altura : 9.89 cm
 Densidad seca : 0.95 g/cm³
 Gravedad de sólidos : 2.47

Humedad inicial : 60.7 %
 Humedad final : 64.2 %
 Saturación inicial : 93.2 %
 Saturación final : 98.7 %

Cálculo de parámetro "B"

Presión de celda
 Inicial : 3 kg/cm³
 Final : 3.21 kg/cm³

Presión de poros
 Inicial : 2.86 kg/cm³
 Final : 3.06 kg/cm³

Contrapresión
 Inicial : 2.86 kg/cm³
 Final : 3.06 kg/cm³

Parám. "B" : 96 %

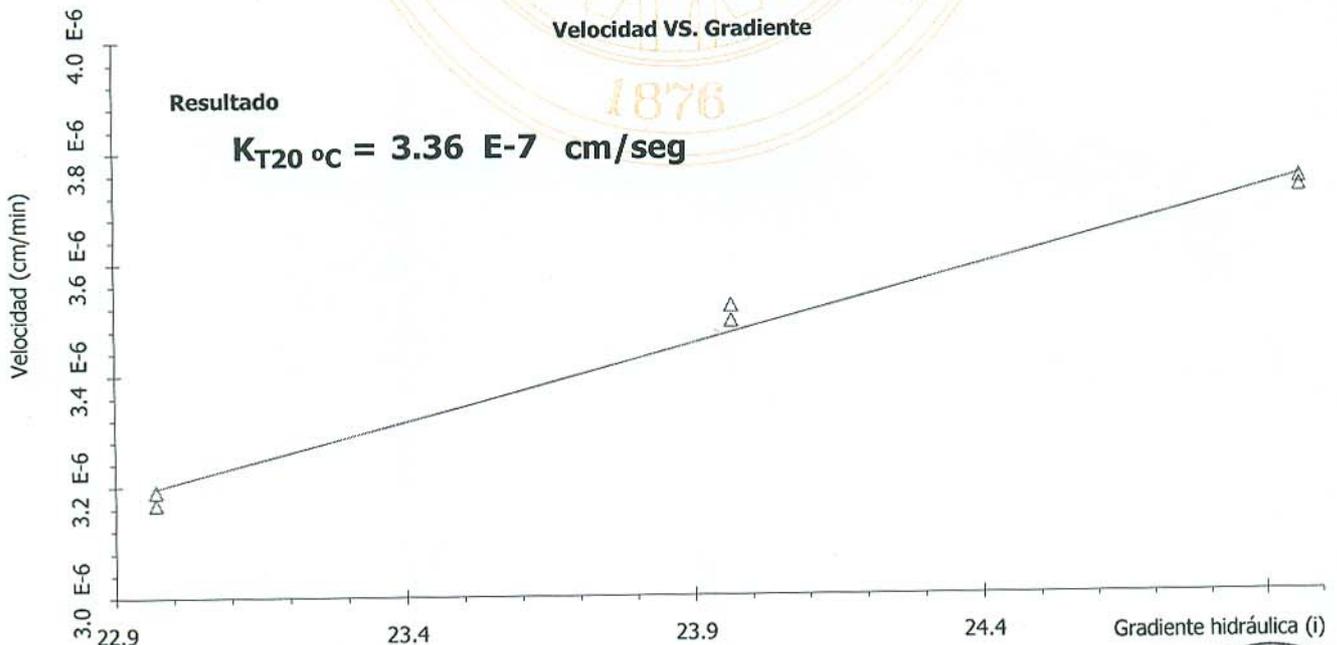
Cálculo de conductividad hidráulica

P. Entrada (kg/cm ²)	Tiempo (seg)	Volumen (cm ³)	Temp. (°C)	Gradiente (i)	Velocidad (cm/seg)	K _{T20 °C} (cm/seg)
3.29	16740	1.00	26.0	23.0	3.17 E-6	1.20 E-7
3.29	16620	1.00	26.0	23.0	3.19 E-6	1.20 E-7
3.30	15180	1.00	26.0	24.0	3.49 E-6	1.26 E-7
3.30	15060	1.00	26.0	24.0	3.52 E-6	1.27 E-7
3.31	14220	1.00	26.0	25.0	3.73 E-6	1.30 E-7
3.31	14160	1.00	26.0	25.0	3.75 E-6	1.30 E-7

Velocidad VS. Gradiente

Resultado

K_{T20 °C} = 3.36 E-7 cm/seg



Observación :

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

David Luna Duran
DAVID LUNA DURAN
INGENIERO CIVIL - CIP. 48988
JEFE DEL LAB. GEOTECNICO



ANEXO IV
Análisis de infiltración

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
MEMORIA DE CÁLCULO**
Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 1
ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 512.00	Se : Grado de saturación efectiva	= 0.881
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.126	m : Van Genuchten (1980)	= 0.714
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.07	a : Slack (1980)	= 0.941
n : Porosidad	= 0.41	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.369
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 3.50	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.018
b : Constante de Slack (1980)	= 0.20	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.699
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 15.00	q, ip : caudal de llenado (mm/hr/m ²)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmision Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 254.10 \text{ mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right)$$

$$\psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 16.17 \text{ cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 79.99$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 12.00$$

$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Consideraciones iniciales

Nivel freatico (m)	= 1.25
Carga hidraulica libre (cm)	= 30.0

Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m)

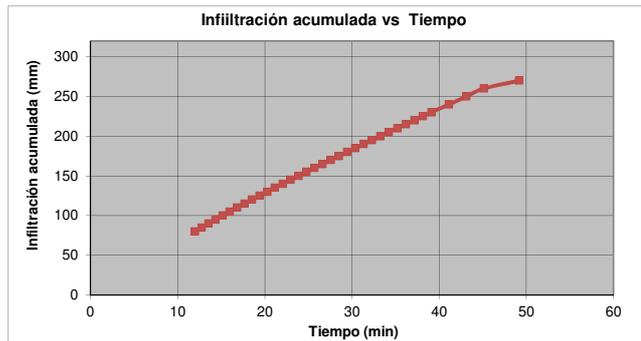
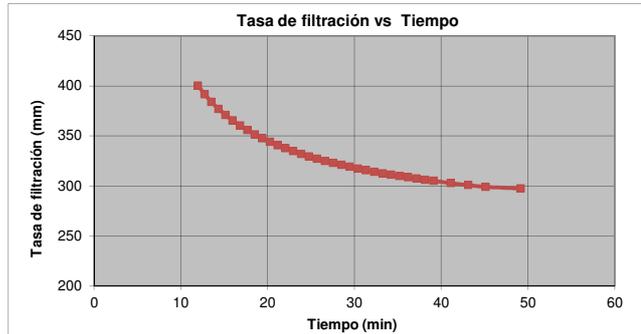
= 0.20

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m)

= 0.38

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
80.0	79.99	400.00	400.00	12.00	12.00	0.00
85.0	5.01	391.40	387.59	0.78	12.77	0.21
90.0	5.00	383.77	380.36	0.79	13.56	0.53
95.0	5.00	376.95	373.88	0.80	14.37	0.97
100.0	5.00	370.81	368.03	0.82	15.18	1.50
105.0	5.00	365.25	362.72	0.83	16.01	2.12
110.0	5.00	360.20	357.89	0.84	16.85	2.83
115.0	5.00	355.58	353.47	0.85	17.69	3.60
120.0	5.00	351.35	349.41	0.86	18.55	4.44
125.0	5.00	347.46	345.67	0.87	19.42	5.35
130.0	5.00	343.87	342.21	0.88	20.30	6.31
135.0	5.00	340.55	339.00	0.88	21.18	7.33
140.0	5.00	337.46	336.02	0.89	22.08	8.40
145.0	5.00	334.59	333.24	0.90	22.98	9.51
150.0	5.00	331.90	330.65	0.91	23.88	10.66
155.0	5.00	329.39	328.22	0.91	24.80	11.86
160.0	5.00	327.04	325.94	0.92	25.72	13.09
165.0	5.00	324.83	323.79	0.93	26.64	14.37
170.0	5.00	322.75	321.77	0.93	27.58	15.67
175.0	5.00	320.79	319.86	0.94	28.51	17.00
180.0	5.00	318.94	318.06	0.94	29.46	18.37
185.0	5.00	317.18	316.35	0.95	30.41	19.76
190.0	5.00	315.52	314.74	0.95	31.36	21.19
195.0	5.00	313.95	313.20	0.96	32.32	22.63
200.0	5.00	312.45	311.74	0.96	33.28	24.10
205.0	5.00	311.03	310.35	0.97	34.25	25.60
210.0	5.00	309.67	309.03	0.97	35.22	27.11
215.0	5.00	308.38	307.76	0.97	36.19	28.65
220.0	5.00	307.15	306.56	0.98	37.17	30.21
225.0	5.00	305.97	305.40	0.98	38.15	31.78
230.0	5.00	304.84	303.78	0.99	39.14	33.39
240.0	10.00	302.73	301.75	1.99	41.13	35.03
250.0	10.00	300.78	299.88	2.00	43.13	36.69
260.0	10.00	298.98	298.15	2.01	45.14	38.39
270.0	10.00	297.32	148.66	4.04	49.18	42.58

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 12.0 min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 37.2 min.

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
MEMORIA DE CÁLCULO**
Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 2
ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 150.00	Se : Grado de saturación efectiva	= 0.881
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.15	m : Van Genuchten (1980)	= 0.714
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.07	a : Slack (1980)	= 0.941
n : Porosidad	= 0.41	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.369
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 3.50	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.033
b : Constante de Slack (1980)	= 0.20	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.699
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 15.00	q, ip : caudal de llenado (mm/hr/m2)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmision Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 74.44 \text{ mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right) \quad \psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 16.12 \text{ cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 9.58$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 1.44$$

Consideraciones iniciales

Nivel freatico (m) = 2.45
Carga hidraulica libre (cm) = 30.0

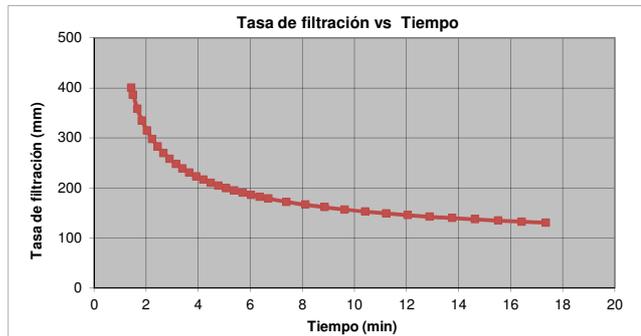
$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m) = 0.02

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m) = 0.06

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
9.6	9.58	400.00	400.00	1.44	1.44	0.00
10.0	0.42	386.43	372.24	0.06	1.50	0.23
11.0	1.00	358.06	346.25	0.17	1.67	0.93
12.0	1.00	334.43	324.43	0.18	1.85	2.02
13.0	1.00	314.43	305.86	0.19	2.04	3.44
14.0	1.00	297.29	289.86	0.20	2.24	5.16
15.0	1.00	282.43	275.93	0.21	2.45	7.12
16.0	1.00	269.43	263.70	0.22	2.68	9.29
17.0	1.00	257.96	252.86	0.23	2.91	11.66
18.0	1.00	247.77	243.21	0.24	3.15	14.20
19.0	1.00	238.64	234.54	0.25	3.40	16.89
20.0	1.00	230.43	226.72	0.26	3.66	19.71
21.0	1.00	223.01	219.63	0.27	3.93	22.66
22.0	1.00	216.25	213.17	0.28	4.21	25.72
23.0	1.00	210.09	207.26	0.29	4.50	28.89
24.0	1.00	204.44	201.84	0.29	4.79	32.15
25.0	1.00	199.24	196.84	0.30	5.09	35.49
26.0	1.00	194.44	192.21	0.31	5.40	38.92
27.0	1.00	189.99	187.93	0.32	5.71	42.42
28.0	1.00	185.86	183.94	0.32	6.04	45.99
29.0	1.00	182.02	180.23	0.33	6.37	49.62
30.0	1.00	178.44	175.19	0.34	6.70	53.32
32.0	2.00	171.94	169.07	0.70	7.40	57.12
34.0	2.00	166.20	163.65	0.72	8.12	61.01
36.0	2.00	161.10	158.82	0.74	8.87	64.99
38.0	2.00	156.54	154.49	0.77	9.63	69.05
40.0	2.00	152.44	150.58	0.79	10.42	73.18
42.0	2.00	148.72	147.04	0.81	11.23	77.37
44.0	2.00	145.35	143.81	0.83	12.05	81.61
46.0	2.00	142.26	140.85	0.84	12.90	85.91
48.0	2.00	139.44	138.14	0.86	13.76	90.25
50.0	2.00	136.84	135.64	0.88	14.64	94.63
52.0	2.00	134.44	133.33	0.89	15.53	99.06
54.0	2.00	132.22	131.19	0.91	16.44	103.52
56.0	2.00	130.15	129.26	0.92	17.36	108.02

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 1.5 min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 4.8 min.

ANÁLISIS DE FILTRACIÓN MEMORIA DE CÁLCULO

Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 3

ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 800.0	Se :Grado de saturación efectiva	= 0.879
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.20	m :Van Genuchten (1980)	= 0.500
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.07	a : Slack (1980)	= 0.941
n : Porosidad	= 0.38	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.342
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 2.00	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.113
b : Constante de Slack (1980)	= 0.20	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.699
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 14.00	q, ip caudal de llenado (mm/hr/m2)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmision Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 205.87 \text{ mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right) \quad \psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 14.86 \text{ cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 28.37$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 4.26$$

$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Consideraciones iniciales

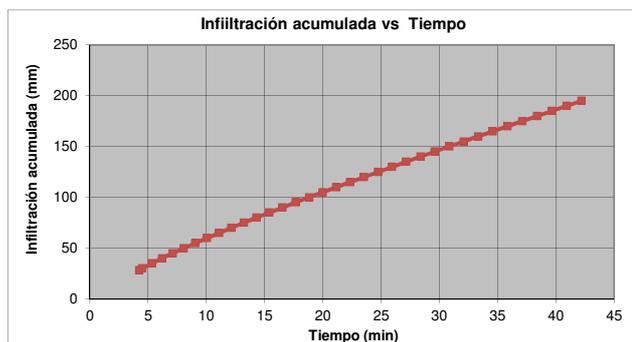
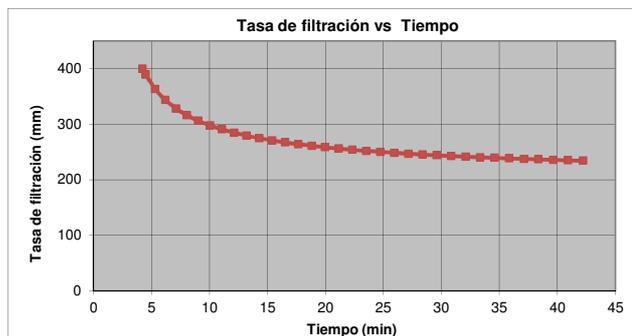
Nivel freatico (m) = 5.00
Carga hidraulica libre (cm) = 30.0

Prof.alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m) = 0.07

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m) = 0.29

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
28.4	28.37	400.00	400.00	4.26	4.26	0.00
30.0	1.63	389.43	376.32	0.25	4.51	0.18
35.0	5.00	363.21	353.37	0.83	5.33	0.79
40.0	5.00	343.54	335.89	0.87	6.21	1.73
45.0	5.00	328.24	322.12	0.91	7.12	2.93
50.0	5.00	316.01	311.00	0.95	8.07	4.33
55.0	5.00	305.99	301.82	0.98	9.05	5.89
60.0	5.00	297.65	294.12	1.01	10.06	7.60
65.0	5.00	290.59	287.56	1.03	11.09	9.42
70.0	5.00	284.54	281.92	1.05	12.14	11.35
75.0	5.00	279.29	277.00	1.07	13.22	13.36
80.0	5.00	274.70	272.68	1.09	14.31	15.45
85.0	5.00	270.66	268.86	1.11	15.42	17.60
90.0	5.00	267.06	265.45	1.12	16.54	19.82
95.0	5.00	263.84	262.39	1.14	17.68	22.09
100.0	5.00	260.94	259.63	1.15	18.83	24.41
105.0	5.00	258.32	257.12	1.16	19.99	26.77
110.0	5.00	255.93	254.84	1.17	21.16	29.17
115.0	5.00	253.75	252.76	1.18	22.34	31.61
120.0	5.00	251.76	250.84	1.19	23.54	34.08
125.0	5.00	249.92	249.08	1.20	24.74	36.58
130.0	5.00	248.23	247.45	1.21	25.95	39.11
135.0	5.00	246.66	245.93	1.22	27.16	41.66
140.0	5.00	245.20	244.53	1.22	28.39	44.24
145.0	5.00	243.85	243.21	1.23	29.62	46.84
150.0	5.00	242.58	241.99	1.24	30.85	49.47
155.0	5.00	241.40	240.84	1.24	32.09	52.11
160.0	5.00	240.29	239.77	1.25	33.34	54.77
165.0	5.00	239.24	238.75	1.25	34.60	57.45
170.0	5.00	238.26	237.80	1.26	35.86	60.15
175.0	5.00	237.34	236.90	1.26	37.12	62.86
180.0	5.00	236.46	236.05	1.27	38.39	65.59
185.0	5.00	235.64	235.24	1.27	39.66	68.32
190.0	5.00	234.85	234.48	1.28	40.94	71.08
195.0	5.00	234.11	233.76	1.28	42.22	73.84

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 4.3 min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 22.3 min.

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
MEMORIA DE CÁLCULO**
Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 4

ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 586.00	Se : Grado de saturación efectiva	= 0.892
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.13	m : Van Genuchten (1980)	= 0.500
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.03	a : Slack (1980)	= 0.941
n : Porosidad	= 0.46	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.414
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 2.00	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.012
b : Constante de Slack (1980)	= 0.20	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.699
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 62.50	q, ip : caudal de llenado (mm/hr/m2)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmision Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 166.21 \text{ mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right)$$

$$\psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 67.50 \text{ cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 160.76$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 24.11$$

$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Consideraciones iniciales

Nivel freatico (m) = 5.00

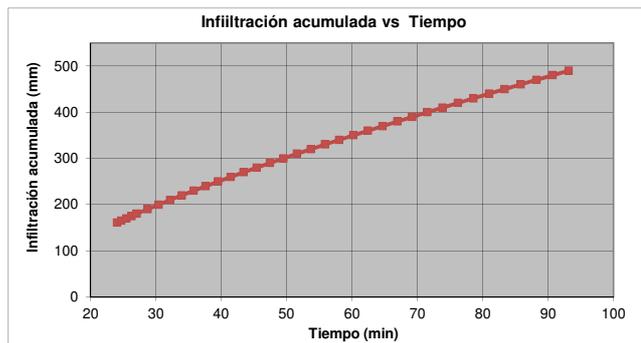
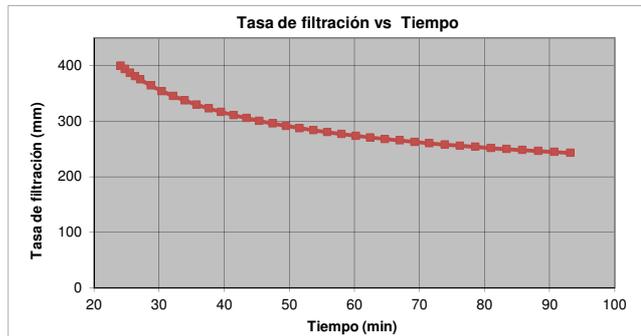
Carga hidraulica libre (cm) = 30.0

Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m) = 0.35

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m) = 0.67

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
160.8	160.76	400.00	400.00	24.11	24.11	0.00
165.0	4.24	393.99	390.64	0.65	24.76	0.10
170.0	5.00	387.29	384.13	0.77	25.53	0.31
175.0	5.00	380.98	377.99	0.79	26.32	0.63
180.0	5.00	375.01	369.52	0.80	27.12	1.05
190.0	10.00	364.02	359.08	1.65	28.77	1.65
200.0	10.00	354.13	349.66	1.69	30.46	2.41
210.0	10.00	345.18	341.11	1.74	32.20	3.32
220.0	10.00	337.05	333.33	1.78	33.98	4.37
230.0	10.00	329.62	326.21	1.82	35.80	5.55
240.0	10.00	322.81	319.68	1.86	37.66	6.83
250.0	10.00	316.55	313.65	1.90	39.56	8.22
260.0	10.00	310.76	308.09	1.93	41.49	9.71
270.0	10.00	305.41	302.92	1.96	43.45	11.29
280.0	10.00	300.44	298.12	2.00	45.45	12.95
290.0	10.00	295.81	293.65	2.03	47.48	14.68
300.0	10.00	291.49	289.47	2.06	49.54	16.49
310.0	10.00	287.45	285.55	2.09	51.62	18.37
320.0	10.00	283.66	281.88	2.12	53.74	20.31
330.0	10.00	280.10	278.42	2.14	55.88	22.30
340.0	10.00	276.75	275.17	2.17	58.05	24.36
350.0	10.00	273.59	272.10	2.19	60.24	26.47
360.0	10.00	270.61	269.20	2.22	62.46	28.62
370.0	10.00	267.79	266.45	2.24	64.70	30.83
380.0	10.00	265.11	263.85	2.26	66.96	33.07
390.0	10.00	262.58	261.37	2.29	69.25	35.36
400.0	10.00	260.17	259.02	2.31	71.55	37.69
410.0	10.00	257.88	256.79	2.33	73.88	40.06
420.0	10.00	255.69	254.65	2.35	76.23	42.47
430.0	10.00	253.61	252.62	2.37	78.59	44.91
440.0	10.00	251.63	250.68	2.38	80.98	47.38
450.0	10.00	249.73	248.82	2.40	83.38	49.89
460.0	10.00	247.91	247.04	2.42	85.80	52.42
470.0	10.00	246.17	245.34	2.44	88.24	54.98
480.0	10.00	244.51	243.71	2.45	90.69	57.58
490.0	10.00	242.91	242.15	2.47	93.16	60.19

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 24.11 min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 64.70 min.

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
MEMORIA DE CÁLCULO**
Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 5
ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 160.00	Se : Grado de saturación efectiva	= 0.892
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.33	m : Van Genuchten (1980)	= 0.474
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.03	a : Slack (1980)	= 0.905
n : Porosidad	= 0.46	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.414
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 1.90	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.306
b : Constante de Slack (1980)	= 0.35	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.677
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 65.00	q, ip : caudal de llenado (mm/hr/m2)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmision Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 40.53 \text{ mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right)$$

$$\psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 69.70 \text{ cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 9.90$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 1.49$$

$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Consideraciones iniciales

Nivel freatico (m) = 1.40

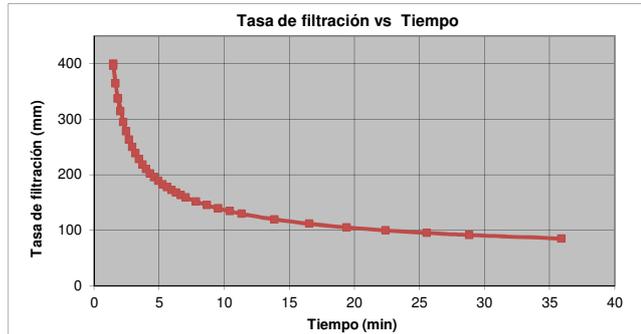
Carga hidraulica libre (cm) = 30.0

Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m) = 0.022

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m) = 0.05

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
9.9	9.90	400.00	400.00	1.49	1.49	0.00
10.0	0.10	396.44	380.26	0.01	1.50	0.06
11.0	1.00	364.09	350.60	0.16	1.66	0.66
12.0	1.00	337.12	325.72	0.18	1.84	1.71
13.0	1.00	314.31	325.72	0.19	2.03	3.13
12.0	-1.00	337.12	315.94	-0.18	1.86	4.18
14.0	2.00	294.75	286.28	0.41	2.26	5.94
15.0	1.00	277.80	270.39	0.22	2.48	7.97
16.0	1.00	262.97	256.43	0.23	2.71	10.26
17.0	1.00	249.89	244.07	0.24	2.95	12.76
18.0	1.00	238.26	233.06	0.25	3.20	15.45
19.0	1.00	227.85	223.17	0.26	3.46	18.32
20.0	1.00	218.49	214.25	0.27	3.74	21.35
21.0	1.00	210.01	206.16	0.29	4.02	24.51
22.0	1.00	202.31	198.79	0.30	4.32	27.81
23.0	1.00	195.27	192.05	0.31	4.63	31.22
24.0	1.00	188.83	185.86	0.32	4.94	34.74
25.0	1.00	182.89	180.16	0.33	5.27	38.36
26.0	1.00	177.42	174.88	0.34	5.61	42.07
27.0	1.00	172.35	169.99	0.35	5.96	45.86
28.0	1.00	167.64	165.45	0.36	6.32	49.74
29.0	1.00	163.26	161.21	0.37	6.68	53.68
30.0	1.00	159.17	155.46	0.38	7.06	57.70
32.0	2.00	151.75	148.48	0.79	7.85	61.83
34.0	2.00	145.21	142.30	0.83	8.68	66.08
36.0	2.00	139.39	136.79	0.86	9.54	70.42
38.0	2.00	134.19	131.85	0.89	10.43	74.85
40.0	2.00	129.51	124.56	0.93	11.36	79.36
45.0	5.00	119.62	115.67	2.51	13.87	84.03
50.0	5.00	111.71	108.48	2.69	16.55	88.84
55.0	5.00	105.24	102.54	2.85	19.40	93.75
60.0	5.00	99.85	97.57	3.00	22.41	98.75
65.0	5.00	95.28	93.33	3.15	25.56	103.83
70.0	5.00	91.37	88.20	3.28	28.84	108.98
80.0	10.00	85.02	82.55	7.06	35.90	114.23
90.0	10.00	80.07	40.04	7.49	43.39	119.56

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 1.49min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 4.6 min.

ANÁLISIS DE FILTRACIÓN MEMORIA DE CÁLCULO

Método: Green-Ampt modificado por Mein y Larson (GAML)

UBICACIÓN: Unidad de producción UP- 6

ELABORADO: César Torres Paitan

Parametros del suelo

Ks : Conductividad hidraulica saturada (mm/hr)	= 95.00	Se : Grado de saturación efectiva	= 0.881
θ_i : Humedad volumetrica inicial o natural	= 0.10	m : Van Genuchten (1980)	= 0.667
θ_r : Humedad volumetrica residual	= 0.07	a : Slack (1980)	= 0.929
n : Porosidad	= 0.41	θ_w : H. zona de transmisión (0.9* θ_s)	= 0.369
n : Constante de Van Genuchten (1980)	= 3.00	Kr(θ_i) : Slack (1980)	= 0.006
b : Constante de Slack (1980)	= 0.25	Kr(θ_w) : Slack (1980)	= 0.692
ψ_e : Pot. matricial. Pot. entrada de aire (cm)	= 40.00	q, ip : caudal de llenado (mm/hr/m2)	= 400.00

Conductividad hidraulica en la zona de transmisión Kr(θ_w) - Van Genuchten.

$$K_r(\theta_w) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad K(\theta_w) = K_r(\theta_w) K_s = 42.42 \quad \text{mm/hr}$$

Potencial matricial en el frente de humedecimiento ψ_f - Slack.

$$K_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right) \quad \psi_f = \frac{\psi_e \left[K_r(\theta_w)^a - K_r(\theta_i)^a \right]}{a \left[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i) \right]} = 44.06 \quad \text{cm}$$

Análisis de filtración - GAML

Lámina infiltrada antes del empozamiento (mm)

$$I_p = \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} = 16.36$$

T. antes de empozamiento tp (min)

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} = 2.45$$

$$i = K_s \left(1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right)$$

Consideraciones iniciales

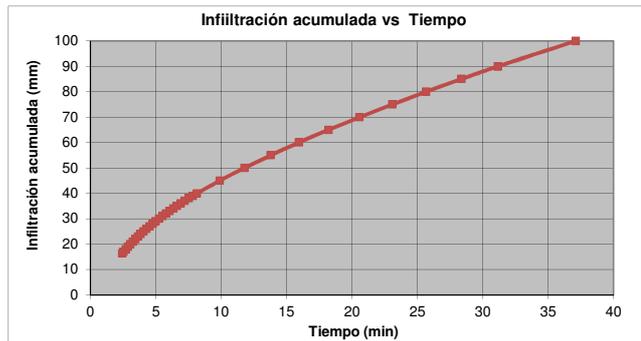
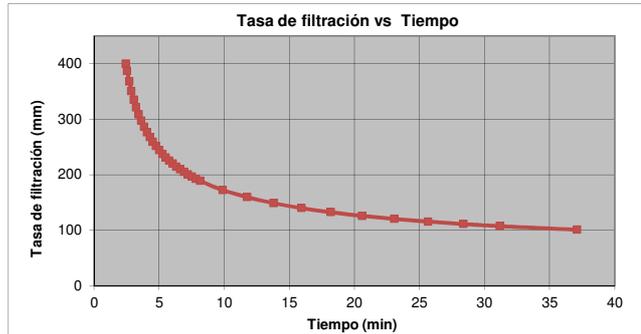
Nivel freatico (m) = 1.40
Carga hidraulica libre (cm) = 30.0

Prof. alcanzada del frente de humedecimiento antes de empezar el empozamiento (m) = 0.04

Prof. del frente de humedecimiento al momento de alcanzar la carga hidraulica propuesta (m) = 0.08

I (mm)	ΔI (mm)	i (mm/h)	im (mm/h)	Δt (min)	t acum (min)	H acum (cm)
16.4	16.36	400.00	400.00	2.45	2.45	0.00
17.0	0.64	386.55	376.99	0.10	2.55	0.22
18.0	1.00	367.43	358.88	0.16	2.72	0.77
19.0	1.00	350.33	342.63	0.17	2.89	1.59
20.0	1.00	334.93	327.97	0.18	3.07	2.68
21.0	1.00	321.00	314.67	0.19	3.25	4.00
22.0	1.00	308.34	302.56	0.19	3.45	5.52
23.0	1.00	296.78	291.48	0.20	3.65	7.24
24.0	1.00	286.18	281.30	0.21	3.86	9.14
25.0	1.00	276.43	271.93	0.22	4.08	11.20
26.0	1.00	267.43	263.26	0.22	4.30	13.41
27.0	1.00	259.09	255.23	0.23	4.53	15.76
28.0	1.00	251.36	247.75	0.24	4.77	18.24
29.0	1.00	244.15	240.79	0.25	5.02	20.83
30.0	1.00	237.43	234.28	0.25	5.27	23.54
31.0	1.00	231.14	228.19	0.26	5.53	26.36
32.0	1.00	225.24	222.47	0.27	5.80	29.27
33.0	1.00	219.70	217.09	0.27	6.07	32.28
34.0	1.00	214.48	212.03	0.28	6.35	35.37
35.0	1.00	209.57	207.25	0.29	6.64	38.54
36.0	1.00	204.93	202.73	0.29	6.93	41.79
37.0	1.00	200.53	198.45	0.30	7.23	45.12
38.0	1.00	196.37	194.40	0.31	7.53	48.51
39.0	1.00	192.43	190.55	0.31	7.84	51.97
40.0	1.00	188.68	186.88	0.32	8.16	55.49
45.0	5.00	172.42	165.92	1.74	9.90	59.28
50.0	5.00	159.42	154.11	1.88	11.78	63.29
55.0	5.00	148.79	144.36	2.02	13.80	67.48
60.0	5.00	139.92	136.17	2.14	15.95	71.82
65.0	5.00	132.42	129.21	2.27	18.21	76.28
70.0	5.00	125.99	123.21	2.38	20.59	80.84
75.0	5.00	120.42	117.98	2.49	23.08	85.50
80.0	5.00	115.55	113.40	2.60	25.68	90.24
85.0	5.00	111.25	109.33	2.70	28.38	95.06
90.0	5.00	107.42	104.17	2.79	31.17	99.93
100.0	10.00	100.92	50.46	5.95	37.11	104.92

H acum: Altura de lámina acumulada en la superficie



Observaciones:

- El tiempo transcurrido antes de empezar la formación de la lámina superficial es de 2.45min.
- El tiempo transcurrido para formar la carga hidraulica establecida es de: 5.8 min.

ANEXO V
Panel fotográfico



Foto N° 1 : Vista de la ubicación y ejecución de la calicata C-1. Se observa el material extraído durante la excavación.



Foto N° 2 : Vista del perfil estratigráfico de la calicata C-1. Se observa los estratos encontrados en el perfil de la calicata y no se observa la presencia del nivel freático hasta la profundidad de exploración.



Foto N° 3 : Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo, realizado a diferentes profundidades a lo largo del perfil de la calicata C-1.



Foto N° 4 : Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ con carga variable realizado a diferentes profundidades en la calicata C-1.



Foto N° 5 : Vista Panorámica de la calicata C-2 ejecutada a un costado de la calicata C-3, se observa la presencia del nivel freático.



Foto N° 6 : Vista interior de la calicata C-2. Se observa el nivel freático que se encuentra a 1.40 m de profundidad.



Foto N° 7 : Vista de la ubicación y ejecución de la calicata C-3. Se observa el material extraído durante la excavación.



Foto N° 8 : Vista del perfil estratigráfico de la calicata C-3. Se observan los estratos encontrados en el perfil de la calicata y la presencia del nivel freático a los 1.40 m de profundidad.



Foto N° 9 : Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo, realizado en la calicata C-3.



Foto N° 10 : Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ con carga variable, realizado a diferentes profundidades de la calicata C-3.



Foto N° 11 : Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-3.



Foto N° 12 : Otra vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-3.



Foto N° 13 :Vista de la ubicación y ejecución de la calicata C-4. Se observa el material extraído durante la excavación, además de la presencia del nivel freático que se encontró a los 1.20 m de profundidad.



Foto N° 14 :Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo realizado a diferentes profundidades en la calicata C-4.



Foto N° 15 : Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ con carga variable realizado en la calicata C-4.

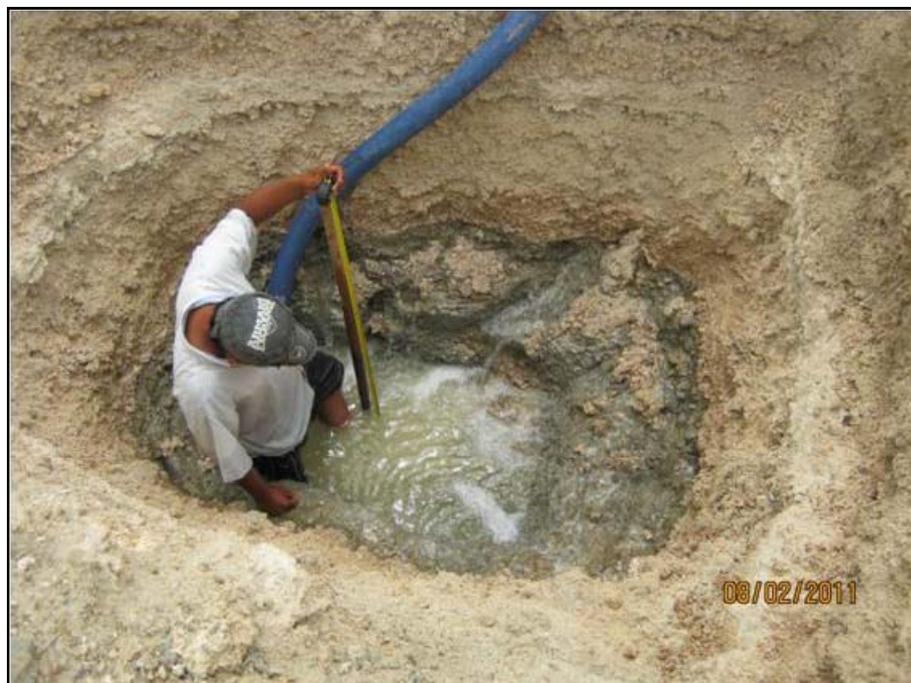


Foto N° 16 : Vista del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-4.



Foto N° 17 :Vista de la ubicación y ejecución de la calicata C-5. Se observa el material extraído durante la excavación.



Foto N° 18 :Vista del perfil estratigráfico de la calicata C-5. Se observa el nivel freático encontrado en la calicata a la profundidad de 1.25 m.



Foto N° 19 : Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo, realizado a diferentes profundidades en la calicata C-5, se observa el material extraído durante el ensayo.



Foto N° 20 : Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ con carga variable, realizado en la calicata C-5.



Foto N° 21 :Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-5.



Foto N° 22 :Otra vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-5.



Foto N° 23 : Vista panorámica de la ejecución de la calicata C-6. Se observa el material extraído durante la excavación. El nivel freático se encontró a la profundidad de 2.45 m.



Foto N° 24 : Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo realizado a diferentes profundidades en la calicata C-6.



Foto N° 25 :Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ con carga variable, realizado a diferentes profundidades en la calicata C-6.

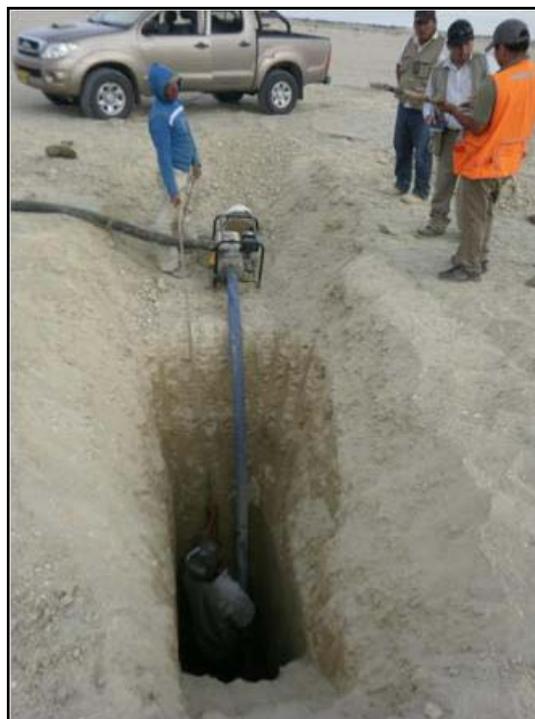


Foto N° 26 :Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por recuperación de caudal, realizado en la calicata C-6.



Foto N° 27 :Vista panorámica de la ubicación y ejecución de la calicata C-7, se observa el material extraído durante la excavación. No se encontró presencia del nivel freático hasta la profundidad de exploración.



Foto N° 28 :Vista del perfil estratigráfico de la calicata C-7, se observa la obtención de las muestras de suelo representativas.

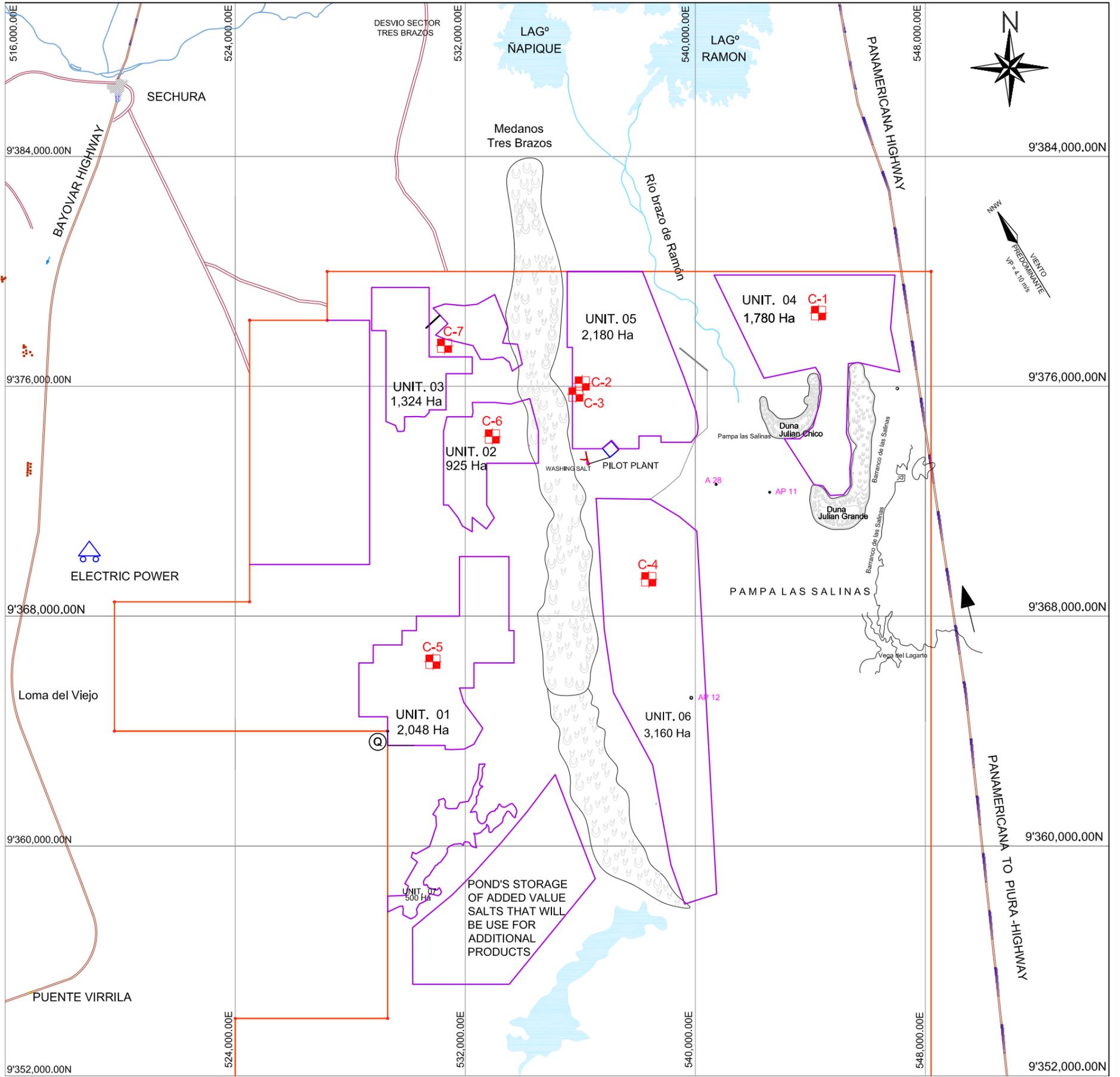


Foto N° 29: Vista de la ejecución del ensayo de densidad de campo, realizado a diferentes profundidades en la calicata C-7.



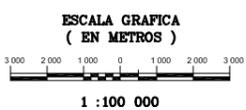
Foto N° 30: Vista de la ejecución del ensayo de permeabilidad in situ por carga variable, realizado a diferentes profundidades en la calicata C-7.

ANEXO VI
Figura



LEYENDA

CALICATA



JORGE E. ALVA HURTADO INGENIEROS E.I.R.L.
CONSULTOR EN INGENIERIA GEOTECNICA

PROYECTO:
EVALUACION DE FILTRACIONES PARA LAGUNAS DE SALMUERAS

SOLICITANTE:
AMERICAS POTASH PERU S.A.

PLANO: UBICACION DE CALICATAS	UBICACION: DISTRITO : SECHURA PROVINCIA : SECHURA DEPARTAMENTO : PIURA
---	---

APROBACION: Dr. J. Alva H.	DIBUJO: G.A.LL	ESCALA: S / E	PLANO N°: PU - 01
	FECHA: FEB.2011		