

# **Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento**



# Abstract

This project was done to study a road in the province of Cartago. It is to determine the effect of soil saturation, due to the precipitation that presents the site, California Bearing Ratio by laboratory and field tests. Also, through dampness models are determined for each month of the year for a rainy scene, designing the structure of the road for a laboratory CBR, which is compared by the probabilistic design associated with the climatic conditions of the place.

Through laboratory testing is done to establish the relationship between CBR value and the change of soil saturation, in addition undertakes graphs that determine the behavior of CBR depending on the dry density and degree of saturation.

Manage to evaluate the soil of the subgrade through the field CBR test, where the expected results are not satisfactory. Be evaluated the performance in terms of performance and productivity, to compare the procedures of the laboratory tests and field.

It was determined that the climatic effect for the design of the pavement structure for the particular road has an effect on the conventional design, and established that the structure is over designed, where the economic impact of design.

Keywords: CBR field, unsaturated soils, probabilistic design of pavements

# Resumen

Se estudia una carretera en la provincia de Cartago, para determinar el efecto de la saturación del suelo, debido a la precipitación que presenta el lugar, en la relación de soporte de California (CBR), haciendo pruebas de laboratorio y de campo. Además por medio de modelos se determinaron las humedades para cada mes del año para un escenario lluvioso, se diseña la estructura de la carretera para un CBR de laboratorio, el cual es comparado por el diseño probabilístico asociado a las condiciones climáticas particulares del lugar.

Por medio de pruebas de laboratorio se consigue establecer la relación entre el valor de CBR y el cambio de saturación del suelo, además de realizar gráficos que determinan el comportamiento de CBR dependiente de la densidad seca y el grado de saturación.

Se consigue evaluar el suelo de la subrasante por medio de la prueba de CBR en campo, donde los resultados esperados no son satisfactorios. Se buscó evaluar el desempeño en términos de rendimiento y productividad, al comparar los procedimientos de las pruebas de laboratorio y de campo.

Se determinó que el efecto climático para el diseño de la estructura de pavimento para el camino en particular tiene efecto en el diseño convencional, y se estableció que esa estructura está sobre diseñada, donde la repercusión del diseño es económica.

Palabras claves: CBR de campo, suelos no saturados, diseño probabilístico de pavimentos

# **Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento**

# **Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento**

WILLIAM BUSTILLOS ÁLVAREZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCION



# Contenido

<b>PREFACIO</b> .....	<b>1</b>	CLASIFICACIÓN DEL SUELO .....	44
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>2</b>	PRUEBA DE PROCTOR ESTÁNDAR.....	45
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>3</b>	RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EN LABORATORIO .....	48
<b>ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>7</b>	GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	51
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>	VALOR DE CBR A DIFERENTES SATURACIONES .....	51
GENERALES .....	9	RELACIÓN DE SATURACIÓN, DENSIDAD ESPECÍFICA SECA Y CBR .....	75
ESPECÍFICOS .....	9	PRUEBA DE CBR DE CAMPO .....	80
<b>ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	<b>10</b>	SATURACIÓN DEL SUELO SEGÚN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS .....	81
<b>MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>11</b>	VARIACIÓN DE LA DENSIDAD.....	95
SUELOS NO SATURADOS.....	11	DISEÑO DE PAVIMENTO.....	98
PAVIMENTO FLEXIBLE .....	15	ERROR DE CBR DE CAMPO.....	110
DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS.....	17	RENDIMIENTOS Y PRODUCTIVIDAD.....	111
ANÁLISIS DE TRÁFICO.....	22	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>117</b>
PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO PARA LA CREACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS.....	24	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>124</b>
COMPLETAR DATOS DE PRECIPITACIÓN Y ANÁLISIS DEL ÁREA DEL PROYECTO .....	25	CONCLUSIONES .....	124
DETERMINACIÓN DE LA SATURACIÓN DEL SUELO DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN .....	26	RECOMENDACIONES .....	124
DISEÑO PROBABILÍSTICO .....	29	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>126</b>
DETERMINACIÓN DE RENDIMIENTOS DE MANO DE OBRA.....	30	<b>APÉNDICE</b> .....	<b>129</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>33</b>	APÉNDICE 1 .....	130
PREPARACIÓN DEL MATERIAL .....	33	APÉNDICE 2 .....	133
LÍMITE LÍQUIDO, PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DEL SUELO .....	34	APÉNDICE 3 .....	137
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO .....	34	APÉNDICE 4.....	145
PRUEBA DE PROCTOR ESTÁNDAR .....	35	APÉNDICE 5 .....	147
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS.....	35	APÉNDICE 6 .....	149
MÉTODO DE SUB-COMPACTACIÓN (LADD) .....	36	APÉNDICE 7 .....	153
CAPACIDAD DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) .....	39	<b>ANEXOS</b> .....	<b>157</b>
DENSIDAD EN SITIO, MÉTODO DEL CONO DE ARENA .....	42	ANEXO 1.....	158
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>	ANEXO 2.....	161
LÍMITES DE ATTERBERG .....	44	ANEXO 3.....	172
GRANULOMETRÍA .....	44	ANEXO 4.....	175

# Prefacio

En nuestro país se gastan miles de millones en arreglar las carreteras cada año, un ejemplo de una carretera a la que se pudo darle seguimiento fuera de esta investigación, es la ruta 287; esta inicia en la intersección de la ruta dos, por Paso Real se desvía por el puente de Río Térraba hasta llegar a San Vito de Coto Brus, se observó que para los meses de febrero hasta julio la carretera se encontraba en óptimas condiciones y el recorrido se hace entre 40min a una hora. Para los meses de agosto se empieza a deteriorar, y ya para los meses de setiembre, octubre la ruta es intransitable. Se refleja que ahora el recorrido se hace en hora y cuarenta hasta dos horas y media. Los arreglos que hace la municipalidad de la comunidad duran entre seis a siete meses, según comentarios de los vecinos de San Vito. Además en el gasto de los arreglos de la carretera, el camino factura a los usuarios montos altos por usar la carretera. Hay una gran cantidad

de variables del porqué se dan los fallos en la carretera, Moncayo (1987) lo divide en tres grupos, por diseño de pavimento, inadecuado e inexistente mantenimiento y el grupo más grande, por el proceso constructivo.

La investigación se va centrar en el diseño de la carretera, donde se va evaluar la sub-rasante, donde se determina el efecto del cambio de las humedades en el suelo debido a la precipitación mensual, en el diseño de la estructura de pavimentos flexible.

La investigación se realiza en la Sub-división de Geotecnia y Materiales, del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), el cual aportó el equipo y las herramientas para el desarrollo de este proyecto.

# Agradecimientos

Dedico y agradezco mi proyecto a Dios por rodearme de gente buena, darme salud y fortaleza en los momentos difíciles. A mis padres que fueron los pilares fundamentales en mi desarrollo profesional, ellos estuvieron incondicionalmente a lo largo de esta larga carrera que logré emprender. A mis hermanas y hermano que fueron un apoyo en todo momento. A mi novia Karen Vannessa Alvarado Leiton, por brindarme su amor, apoyo, comprensión y ayuda.

Agradezco a mis tíos y tías, que me extendieron una mano cuando yo más los ocupaba. Esta

investigación se pudo realizar por mis tutores en el MOPT el Ingeniero Hugo Chávez, la Ingeniera Cynthia Ortega, los técnicos Miguel García y Alex Guerrero, los choferes Oscar Córdoba y Álvaro, que fueron el equipo de trabajo encargados en ayudarme en las marañas administrativas, traslado y realización de las pruebas, además de mi compañero de carrera Efraín que me brindó información para el diseño. A mi profesor tutor en el Instituto Tecnológico de Costa Rica Ing. Rafael Baltodano.

# Resumen Ejecutivo

El estudio de los suelos no saturados en la mecánica de suelos no es tan amplio, como si lo es en los saturados. Autores como Fredlund, Morgenstern, Barrera (2004) entre otros, tratan de caracterizar el comportamiento de los suelos no saturados. En términos generales la fuerza que actúa en un suelo no saturado es la succión, la cual se puede igualar al efecto de la succión matricial, esta es la diferencia que hay entre la presión de agua y la presión de poro. En diferentes trabajos se ha determinado el efecto de los suelos no saturados en la resistencia del suelo, en corte directo, cohesión del suelo, en ángulo de fricción, para este trabajo se determinara el efecto que causa en la sub-rasante para el diseño de la estructura de pavimento.

El diseño del pavimento consiste en determinar el valor de CBR de la sub-rasante, la sub-base y la base, para así definir los espesores de la estructura del pavimento. El valor de CBR se obtiene haciendo la prueba de CBR, se conforman tres probetas a diferente densidad con la humedad óptima, esta se sumerge en una pileta por cuatro días. La finalidad es exponer al suelo a las peores condiciones de humedad a las que podría estar expuesto en las condiciones reales, al finalizar los días las probetas se fallan y se determina el valor de CBR a 0,1" de penetración.

Pero si en el lugar en que se va a diseñar la carretera nunca llega a comportarse, en tan malas condiciones como las que se reproducen en laboratorio, sería un factor que determine el diseño de la estructura.

Para evaluar el efecto real, se necesita investigar la cantidad de agua que cae en la carretera, por lo que se le pide al Instituto Meteorológico Nacional, los récord de precipitación para la ruta en estudio, con estos datos se hace un pronóstico para determinar el escenario más lluvioso.

La carretera en estudio se divide en siete regiones las cuales van a tener condiciones

diferentes de precipitación, esta se determinó por medio de los polígonos de Thiessen, las características geológicas y de temperatura. Con esta división se determina la humedad para cada región.

Por medio del método desarrollado por Schosinsky (2007) de balance hídrico, tomando en cuenta la precipitación se pudo calcular la humedad del suelo para cada mes del año. Este modelo tiene algunas limitantes, cuando se determinan factores como la capacidad de campo, gravedad aparente, además que cuando se analiza la forma en que la precipitación afecta el suelo debajo de una carretera se debe considerar el efecto de la carretera propiamente, de las cunetas y contra cunetas si las hay, en cómo puede repercutir a la humedad del suelo.

Se determinó que para las regiones de la 1 a la 5, la máxima humedad del suelo es de 29%, para la región 5 es de 33,05% y la región 7 es de 34,26%. El cambio de la humedad del suelo, se ve en el cambio de volumen de este, por lo que por forma analítica se determina el cambio de la densidad. Estos dos parámetros son los que se van a tomar en cuenta para el diseño de la estructura del pavimento.

Rosenblueth (1975) expone un análisis probabilístico donde se puede correlacionar  $n$  variables independientes, las variables que se tomarán son la densidad del suelo y la humedad; con estos factores se determina el factor de CBR, el cual se va usar en el diseño probabilístico del pavimento flexible.

A continuación se observa un cuadro donde se determina la confiabilidad del diseño del pavimento de forma convencional, según las condiciones que se presenta en el sitio.

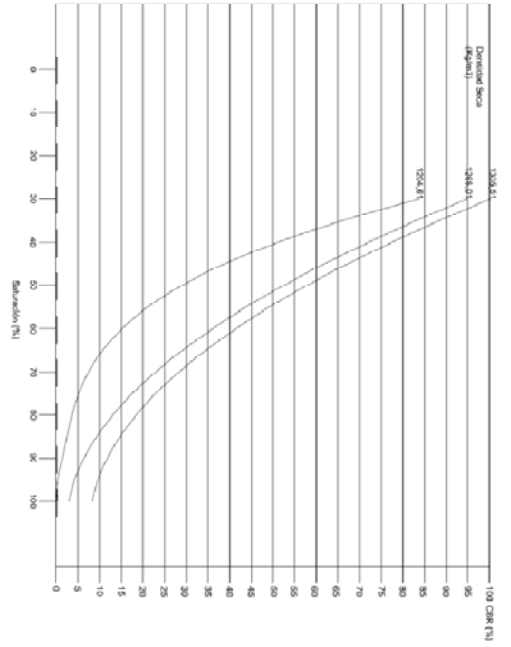
**CUADRO. DISEÑO PROBABILÍSTICO  
DEL PAVIMENTO, EVALUANDO EL  
DISEÑO CONVENCIONAL**

Estación	Región	S*	Índice de confiabilidad ( $\beta$ )
1+000	1	49	5,8
	2		5,8
1+900	3	39	3,0
	4		4,4
2+700	5	49	17,4
3+900	6	72	5,0
	7		4,3

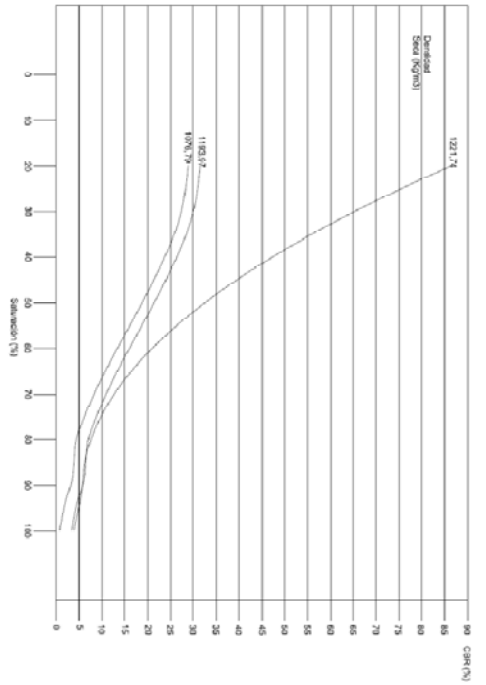
Para las diferentes regiones se ve que la estructura de pavimento tiene índices altos, lo que indica que las condiciones que se sugieren o las que se reproducen en el laboratorio, son mucho más adversas que las que se presentan en lugar que se diseña la carretera.

Se establece que a la hora de construir se pueden tener estructuras menores, y ahorrarse varios miles, ya que las condiciones del lugar lo permiten.

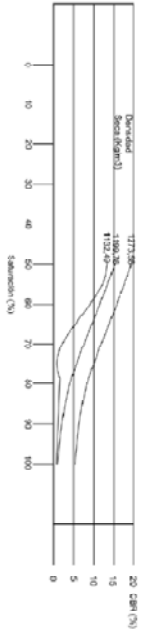
Se establece como incide la humedad y la densidad en el valor de CBR, se construyen cuatro graficas de tres variables, saturación, densidad y CBR, para cada estación en que se dividió la carretera, como se puede apreciar en la siguiente figura.



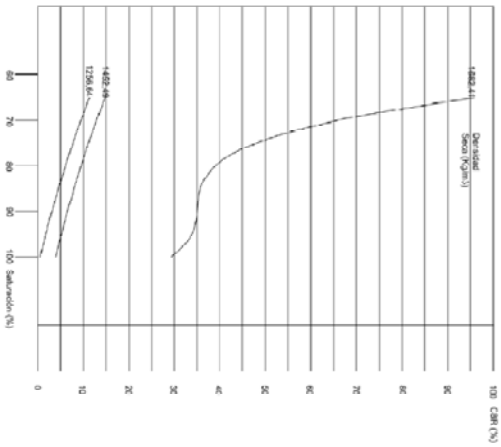
a)



b)



c)



d)

Figura. Gráficas de grado de saturación, densidad seca y CBR para las estaciones a) 1+000, b) 1+900, c) 2+700 y d) 3+900.

El suelo también se evaluó en el sitio por medio de la prueba de CBR de campo. Al realizar estas pruebas también se busca capacitar al personal del laboratorio del MOPT en el manejo del equipo de campo, en la toma de datos y los cuidados que se deben tener en la aplicación de la prueba. Esto no se cumple al 100%, ya que se realizaron pocas pruebas en campo.

Se logra determinar el CBR de campo, el cual se comparó al CBR de las gráficas, el error

relativo que se presentó fue muy alto, para casi la mayoría de las pruebas hechas, con excepción de dos pruebas que la aproximación es bastante certera, por la falta de experiencia de los técnicos, los errores relacionados en la ejecución y factores externos, no se podría establecer el CBR de campo como un buen indicador de calidad y control, así como factor de diseño. Merece más estudio y análisis para que se establezca como indicador confiable.

# Antecedentes y Justificación

Las pruebas de CBR de campo y laboratorio se van a realizar en un camino cantonal, de la provincia de Cartago, específicamente el camino 3-01-033 que está comprendido entre la intersección con la ruta número 10, al costado del campo Ayala, y el Río Agua Caliente. Este camino tiene una distancia de 4.3 Km de longitud. Este proyecto nace de la necesidad de las comunidades de contar con una vía que brinde las condiciones adecuadas para el desarrollo, ya que es de gran importancia para la vida social, económica y educativa de las comunidades aledañas. Este proyecto se da en coordinación con las municipalidades de Cartago y Paraíso.

La prueba CBR fue propuesta en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton (1929) y O. J. Porter (1929) del Departamento de Carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carreteras.

Durante la segunda guerra mundial, el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1" ó 0.2" de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar.

También se dice que mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

El método CBR comprende tres ensayos, los cuales son: la determinación de la densidad y humedad, determinación de las propiedades expansivas del material y la determinación de la resistencia a la penetración.

La determinación del CBR va ser diferente de acuerdo con el suelo que se esté analizando o cómo se va hacer la prueba.

Cuando se diseña una carretera, se deben tomar varios parámetros, los cuales varían según el lugar en que se va construir; uno de ellos es el cálculo del CBR. Generalmente el cálculo del CBR, es estimado en la condición más crítica, donde la saturación es del cien por ciento. Con base en esto se determina la capacidad de las diferentes estructuras.

Ahora bien, la determinación de un CBR en campo, en las diferentes condiciones de saturación natural, es decir, la exposición de las diferentes estructuras de pavimento a la cantidad de agua precipitada en el lugar, pueda darle al diseñador una mejor herramienta en el cálculo de las estructuras del pavimento.

Lo que se pretenderá, es verificar si hay alguna optimización en el diseño del pavimento, y correlacionar los resultados del CBR de campo y la saturación, para obtener un CBR optimizado para el diseño, tomando en cuenta la exposición del pavimento a las condiciones meteorológicas del lugar en que se desarrolle el proyecto.

El recolectar las muestras, preparar y fallar las muestras, hasta obtener los resultados, es un proceso que puede llevar varios meses, es de esa forma en que se obtienen los resultados en laboratorio, pero si se utiliza el método en campo, el resultado obtenido es casi de inmediato, lo que representa una maximización en el proceso de obtener los resultados.

Lo que se va proponer es una cuantificación de rendimientos de la mano de obra, se va hacer de esta forma, ya que a la institución, el MOPT, le interesa conocer el rendimiento de mano de obra de ambos métodos, con esto poder determinar la eficiencia en la obtención de los resultados.

Las carreteras del país tienen una longitud de 36 654 Km, donde la red vial nacional cuenta con 7 640 Km, entre carreteras pavimentadas, lastreadas o de tierras, y la red



vial cantonal cuenta con 29 014 Km. Según la estadística dada por MOPT para el año 2007, la inversión bruta para la infraestructura en carreteras es de ₡82 012 120 000 colones, la más importante inversión en el sector transporte.

Las carreteras son una de las claves para el desarrollo del país, reflejo de esto son las grandes inversiones que realiza el país en este tema, pero no solamente es invertir en la nueva infraestructura, también tiene que garantizar el funcionamiento para la cual fue diseñada.

El proyecto va estar orientado, en determinar la capacidad de la sub-rasante, considerando las condiciones climáticas de la ruta en estudio, tomado para verificar si cuenta con alguna variación el California Bearing Ratio (CBR), de laboratorio o de campo.

Con la finalidad de, optimizar el diseño de la estructura de pavimento, en el sentido de que el diseño va ser hecho para las condiciones del lugar en que se va a concretar el proyecto. Lo que puede representar la disminución en espesores del pavimento con respecto al diseño, que involucre el CBR de laboratorio, o el ajuste necesario para que no caiga en el sub-diseño.

Se puede decir si el diseño se maneja en la parte insegura o segura, es decir, si el diseño hecho con el CBR de laboratorio da origen a un pavimento que no va a soportar la carga real de tránsito. Con el CBR de campo se va obtener la capacidad real del pavimento y con la comparación podemos deducir el comportamiento si se maneja en un rango seguro de construcción o inseguro, el cual, va ocupar el rediseño.

El diseño del pavimento en condiciones reales, aparte del mantenimiento normal que se le dan a las carreteras, pueden reducir costos de reparación, bacheos, por eso la importancia de verificar el diseño, con base en la capacidad de soporte. En el país es una gran inversión que se hace año a año, en reparaciones a parte de las inversiones en nuevas rutas o ampliaciones de las ya existentes.

La implicación más importante del proyecto es poder avalar la prueba de CBR en campo, como el método de obtención de los parámetros de diseño del pavimento, donde va tener un trasfondo, ya que, por medio de curvas características, obtener el acostumbrado valor de CBR dado por laboratorio, o esta la otra forma la que podría implicar una mejora en el diseño; utilizando las condiciones de soporte del suelo para cada zona en que se construya, esto toma en cuenta, las condiciones críticas presentes del lugar además de la facilidad de revisar y controlar la construcción.

La implicación social, no solamente va ser en la inversión que haga el estado en bacheos, también hay gasto por parte del usuario de las carreteras, la cual implica más gasto de combustibles y reparaciones mecánicas, por lo dañado del camino que no cumple para lo que fue construido.

El proyecto va contar con el Laboratorio del MOPT, donde van hacer las pruebas de CBR, aparte del equipo de campo para realizar la prueba in situ. La movilización del equipo a la ruta en estudio va estar a cargo del MOPT.

# Objetivos

## Generales

- Evaluar el efecto de la saturación en el cálculo de la capacidad soportante de la sub-rasante en la ruta en estudio mediante el uso del ensayo de CBR de campo y de laboratorio.
- Establecer la validez del CBR de campo como método para obtener el parámetro de diseño de la estructura de pavimento.

## Específicos

- Medir la capacidad soportante de estructura de sub-rasante mediante la realización de ensayos de CBR de campo y de laboratorio para la ruta en estudio.
- Construir una curva característica CBR en función del grado de saturación, para el análisis de las condiciones que se presentan en el campo.
- Determinar las dimensiones de la estructura de pavimentos según los datos obtenidos para la ruta de estudio utilizando un diseño probabilístico.
- Realizar una comparación de rendimiento de tiempo de personal, considerando las diferentes metodologías en el cálculo de CBR, laboratorio y campo, en el posible efecto en el control y verificación de calidad.

# Alcances y Limitaciones

Se desea evaluar la sub-rasante en diferentes grados de saturaciones, debidos a las diferentes humedades que se encuentran en el sitio, causa de la precipitación del lugar, y si estas condiciones afectan al diseño estructural del pavimento flexible. Por lo que se diseñará la estructura del pavimento en las condiciones que normalmente se hace, aplicando los espesores mínimos. Este diseño se comparará con los diseños obtenidos de forma probabilística de acuerdo con las condiciones climáticas que presenta el lugar.

Se debe aclarar que el método utilizado en la investigación para definir las condiciones de precipitación del sitio no toma los eventos ENOS, los cuales cambia en forma brusca las condiciones del lugar.

Se pondrá en funcionamiento el equipo para realizar pruebas de CBR en campo, donde se determinarán las prácticas adecuadas para realizar las pruebas, dando capacitación a dos técnicos de la Sub-división de Geotecnia y Materiales del MOPT, para que este método se siga aplicando a los proyectos que se encuentran a cargo de la Sub-división.

Se va establecer el comportamiento del factor de diseño del pavimento, relación de soporte de California (CBR), para las diferentes densidades y saturaciones en la realización de gráficas en tres dimensiones, las que relacionan las variables.

Por medio del cálculo de rendimientos y la productividad de las pruebas que se realizan en el laboratorio y campo se compararán los procedimientos para determinar el valor de CBR, con el cual se podrán establecer las condiciones para verificar la calidad y control de las obras.

Las limitantes de este proyecto son varias. Como este proyecto se desarrolla en el laboratorio del MOPT, se van adecuar la realización de pruebas a la disponibilidad de las herramientas, personal, equipo y espacio de trabajo. Además de los procesos administrativos que esto implica.

La realización de las pruebas en sitio fue la principal limitante, debido a que la vagoneta presentaba algunos desperfectos mecánicos, varios meses, luego a esto se le junta la disposición de choferes de la vagoneta, y el "pick up". El tiempo efectivo que se dispuso del equipo de CBR de campo fueron de tres semanas, por lo que nada más se pudieron realizar 19 pruebas, tiempo insuficiente para analizar los errores de la prueba. Ya que, mientras se realizaban las pruebas de campo y se obtenían los resultados de humedad del laboratorio, no se podía realizar el proceso de análisis de los resultados, para ir depurando el procedimiento para realizar las pruebas. En algunas pruebas se contaron con dos gatas hidráulicas, esto fue un factor determinante en el error de estas.

# Marco conceptual

## Suelos no saturados

Cuando se estudian los suelos, para proyectos de ingeniería, se parte de la premisa de que el suelo está totalmente saturado, la condición más desfavorable (Valverde, 2010). Ya que, hoy se tiene un conocimiento muy bueno del comportamiento de los suelos saturados, mediante modelos mecánicos que permiten explicar de forma conjunta todos los comportamientos de resistencia, deformación volumétrica, al corte, entre otras (Barrera, Garnica y Martínez, 2004), por esta condición se vuelve fácil el diseño a estas condiciones.

Se dice que, una gran parte de la población del mundo se encuentra implantada en centros urbanos en que predominan suelos con nivel freático profundos, donde los vacíos del suelo no se encuentran totalmente ocupados por agua y sí con agua y aire. (Alfaro Soto, 2008) También es frecuente tener suelos parcialmente saturados en muchas regiones áridas y semiáridas. (Barrera, et al, 2004)

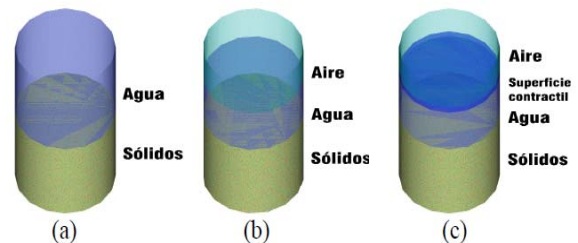
Es aquí donde se evidencia las limitaciones de la mecánica de suelos tradicional, cuando se necesita explicar las deformaciones en suelos no saturados o de las estructuras apoyadas en esos suelos (pavimentos, taludes, cimentaciones entre otros) sujetos a cargas de servicio o en los estados de tensiones totales presentes in situ. Algunos trabajos (Parreira et al., 2004; Alfaro Soto, 2004) han mostrado la influencia del grado de saturación en la deformación y resistencia de los suelos. Esta situación, puede ser más compleja aún, cuando nos encontramos con suelos de características expansivas o colapsables donde la estructura del suelo también influye en la variación del volumen del suelo tal como mostrado por Pereira & Pejón (2004), Teixeira et al. (2004), entre otros. (Alfaro Soto, 2008)

Como se refiere Barrera et al (2004), en las últimas décadas, el estudio de estos suelos

ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación, debido a las dificultades que implica la aplicación de la mecánica del suelo tradicional a los problemas geotécnicos que estos plantean. Por ejemplo, el principio de los esfuerzos efectivos, que constituye uno de los puntos básicos del comportamiento del suelo saturado, aplicado a los no saturados presenta dificultades que no se han resuelto totalmente. Los problemas que entraña el conocimiento de la influencia de nuevas variables de esfuerzos, como la succión, los fenómenos de histéresis respecto a los cambios de humedad, los fenómenos acoplados hidromecánicos, los flujos no lineales y otros aspectos del comportamiento de los suelos no saturados, han llevado a mantener la aplicación de la teoría de los suelos saturados en los estudios y proyectos geotécnicos. (Barrera, et al, 2004)

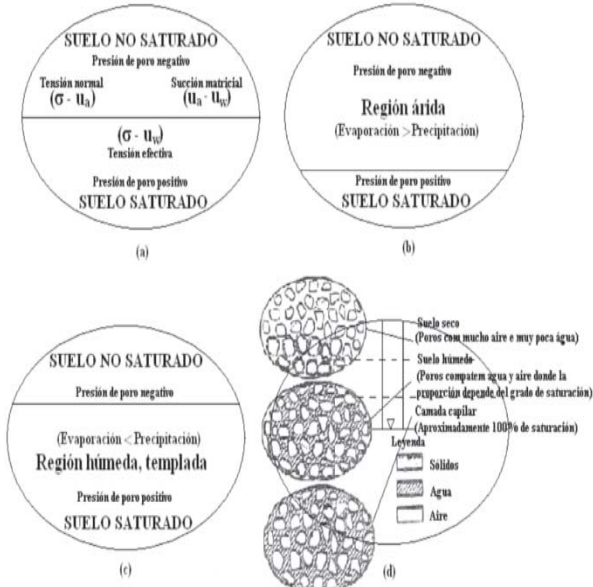
## Esquema de suelo no saturado

Según Rojas (2001), el suelo no saturado la componen cuatro fases en la forma rigurosa de la clasificación, estas son la parte sólida, agua, aire y la superficie contráctil que es una interface de agua-aire, se desprecia cuando se hacen análisis de cambios de volumen, ver la siguiente figura.



**Figura MC1.** Diagrama de fases a) suelo saturado, b) suelo no saturado y c) suelo no saturado en la clasificación rigurosa. (Rojas, 2001).

Otra representación según Fredlund (1977) mencionado por Alfaro Soto (2008), es el suelo no saturado en el medio ambiente, muestran representaciones de suelos en situaciones generales, en región árida y región húmeda, como se aprecia en la siguiente figura.

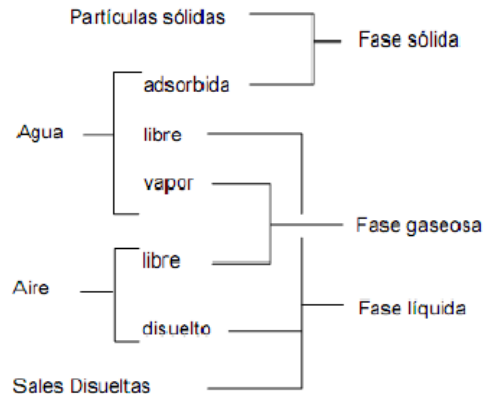


**Figura MC2.** Componentes de un suelo. a) Generalizado, b) Condición en región árida, c) Condición en región humedad y templada y b) Composición de medio poroso. (Alfaro Soto, 2008).

Las figuras MC2a, MC2b y MC2c contienen una línea horizontal que representa el nivel freático y que divide el suelo saturado (debajo de la línea) del suelo no saturado (arriba de la línea) también llamado zona vadosa. Debajo del nivel freático las presiones intersticiales (o presión neutra) serán positivas. Inmediatamente arriba del nivel freático en la zona no saturada ocurre una camada capilar con un grado de saturación de aproximadamente 100% y que puede tener una espesura variable de hasta 10m en función del tipo de suelo (Figura MC2d). Arriba de esa capa el suelo presenta presiones intersticiales o de poro negativas y que resultan de la diferencia de las presiones del aire y del agua. La diferencia entre esas presiones es llamada de succión matricial y que corresponde a una de las dos variables de tensión que describen el comportamiento de un suelo no saturado. (Alfaro Soto, 2008).

Según Yoshimi y Osterberg (1963) mencionado por Korte (2009), presenta un

diagrama de la representación de las fases del suelo no saturado, mostrado en la figura MC3.



**Figura MC3.** Componente de cada una de las fases del suelo no saturado. (Korte, 2009).

Como se ve en la figura anterior los suelos no saturados, y como se mencionó anteriormente, se caracterizan por tres fases en forma general. La fase sólida se encuentra compuesta por partículas sólidas del suelo y por ello, dicha fase varía de un ejemplar a otro, debido a las propiedades características como la granulometría, composición, textura y forma de los materiales.

La fase líquida se encuentra compuesta básicamente por agua, sin embargo, autores como Barrera (2002) mencionado por Korte (2009), el agua se encuentre en tres formas, se tiene el agua higroscópica, la cual es absorbida en la partícula o forma parte de la capa doble difusa, que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas, agua capilar, ésta depende de las fuerzas capilares del suelo y el agua gravitacional, aquella que puede ser separada en condiciones de drenaje libre por gravedad. (Korte, 2009). La fase gaseosa se encuentra conformada por aire y su característica más importante es la compresibilidad, a diferencia del agua. En varios estudios se establece la existencia de relación entre el grado de saturación de los suelos, el contenido de humedad y la forma como se encuentra el aire en el suelo. (Korte, 2009).

## Combinación de esfuerzos

La caracterización de un suelo no saturado según Fredlund y Morgenstern (1977) citado por Barrera et al, se puede hacer tomando dos de las tres combinaciones, son  $(\sigma - \mu_a)$ ,  $(\sigma - \mu_w)$  y  $(\mu_a - \mu_w)$ , a las que se refiere es al esfuerzo total ( $\sigma$ ), presión de aire ( $\mu_a$ ), presión de agua ( $\mu_w$ ), se llegó a esta conclusión ya que se basaron en la forma de las ecuaciones de equilibrio de un elemento diferencial multifase de suelo y en diferentes ensayos a volumen constante, bajo condiciones edométricas e isotropas.

Según Rojas cuando cita Fredlund y Rahardjo (1993), la combinación de variables más usadas es el de esfuerzo neto y la succión de matriz. La succión total del suelo está determinada por la suma de varios factores; Barrera los cita de la siguiente forma como potenciales, los cuales son: el potencial osmótico, potencial gravitacional, potencial matricial (donde se incluye la componente capilar y la componente de adsorción), y potencial neumático.

El potencial gravitatorio está relacionado con la cota a la que se encuentra el agua. El neumático, con la presión de la fase gaseosa, y solo debe considerarse cuando la presión es diferente a la atmosférica. El potencial total de succión es la suma del potencial capilar y el osmótico, y es el que controla el comportamiento de un suelo parcialmente saturado. (Barrera et al, 2004)

El potencial osmótico o la succión osmótica, se deben a la salinidad del suelo, en pruebas de laboratorio por Krahn y Fredlund (1972) citado por Rojas, se demuestra que la succión debido a la osmosis se puede despreciar y la succión total del suelo va ser igual a la succión matricial, que se define como la diferencia entre la presión de aire y presión de agua.

Se han hecho esfuerzos de caracterizar los esfuerzos del suelo no saturado y llegar a tener una formula como la desarrollada por Terzaghi para suelos saturados, y que sea de igual aplicación, por lo que se extrae en la figura MC4 da por Barrera varias correlaciones.

Ecuación	Referencia
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma + p''$	Donald (1956)
$\sigma' = \sigma - \beta' \cdot u_w$	Croney, Coleman & Black (1958)
$\sigma' = \sigma + \Phi \cdot p''$	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a)$	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m \cdot p''_m + \chi_s \cdot p''_s$	Aitchison (1973)
$\sigma' = \sigma - u_w \cdot Sr - (1 - Sr) \cdot u_a$	Öberg & Sällfors (1997)

Donde:

$\chi$ : parámetro relacionado con el grado de saturación;

$u_a, u_w$ : presión del aire y del agua respectivamente;

$p''$ : presión del agua debajo de la atmosférica;

$\beta'$ : factor de unión;

$\Phi$ : parámetro entre 0 y 1;

$\beta$ : factor estadístico para medir el área de contacto;

$\chi_m, \chi_s$ : parámetros de tensión efectiva para succión matricial y de soluto respectivamente;

$h_m, h_s$ : succión matricial y de soluto respectivamente;

$p''_m, p''_s$ : succión matricial y de soluto respectivamente;

$Sr$ : grado de saturación.

**Figura MC4.** Ecuaciones de esfuerzos efectivos dados por varios actores. (Barrea et al, 2004).

De las ecuaciones que se presentaron en la figura anterior, la expresión que se aceptó más en la época de su formulación es la de Bishop (1959), se tiene que el factor  $\chi$  varía entre 0 y 1, donde toma el valor de 0 para suelos secos y uno para suelos saturados y los valores intermediarios dependen de la trayectoria de tensiones, de los ciclos de humedecimiento y secado y principalmente del grado de saturación (Blight, 1967). Posteriormente, estudios experimentales sobre ese tema, mostraron que la ecuación de los esfuerzos efectivos en suelos no saturados presentaba limitaciones, los autores mencionados por barrera Jennings & Burland (1962), muestran que la ecuación de Bishop no relaciona el índice de vacíos con los esfuerzos efectivos, por lo que no describía de forma adecuada la mayoría de los suelos con un grado

de saturación inferior a un determinado valor crítico. (Barrera et al, 2004)

Debido a la complejidad de sacar este valor Aitchison (1967), consideró que ese parámetro solamente es posible obtener un valor apropiado de esfuerzo efectivo considerándose una única trayectoria para cada término ( $\sigma$ ) y ( $\mu_a - \mu_w$ ), razón por la cual resulta innecesaria la cuantificación de  $\chi$ . Debido a las dificultades presentadas para cuantificar los esfuerzos efectivos en una ecuación como parámetro unitario independiente, la evaluación de las propiedades del suelo como variaciones de volumen y resistencia del suelo fueron realizadas utilizando los conceptos de variables de estado según Matyas y Radakhrisma, citados por la Barrera.

## Estructura del suelo

La disposición de las partículas en el suelo, determina su comportamiento mecánico, como pone en ejemplo Barrera, bajo mismas condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, para el mismo suelo y condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir una expansión al mojarlo.

Alonso et al, 1987 citado por Barrera define la estructura en tres estructuras fundamentales formadas por las partículas elementales, agregados de partículas y poros, como se ve en la figura MC5.

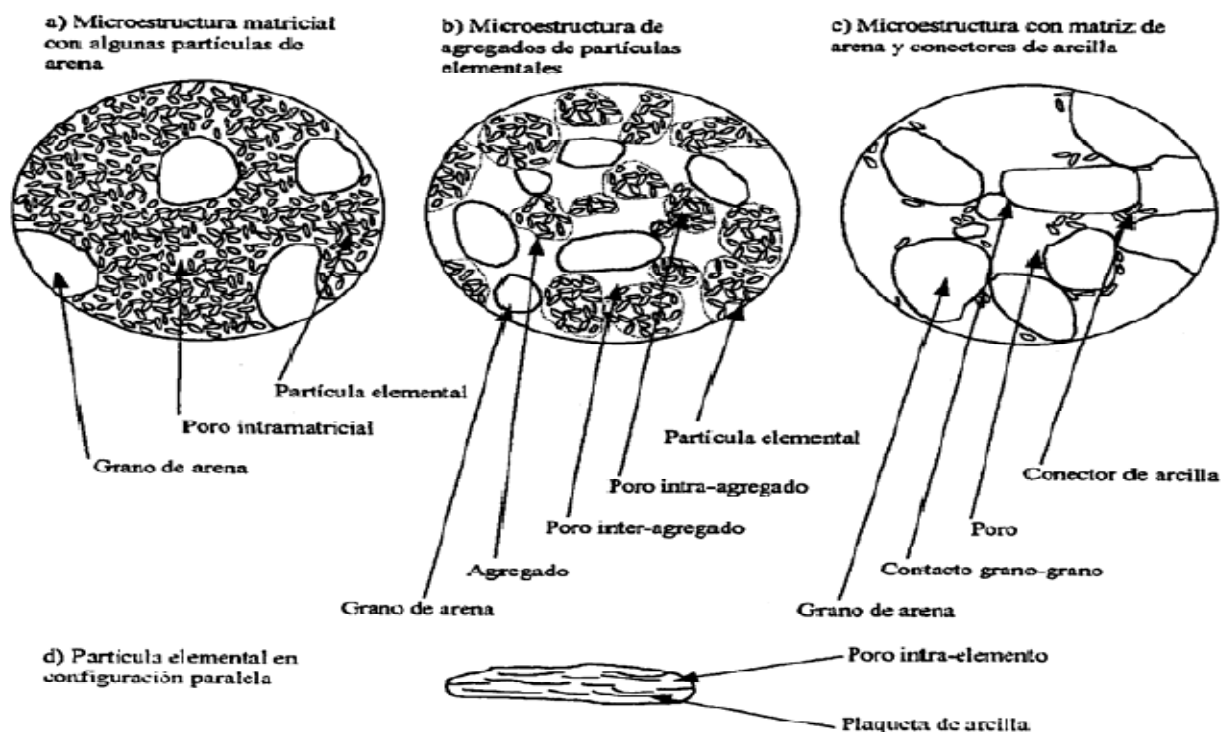


Figura MC5. Estructura del suelo según Alonso.

La microestructura matricial se presenta cuando las partículas elementales están distribuidas de forma homogénea, en cambio la microestructura de agregados de partículas es cuando los granos de arena están rodeados de partículas arcillosas elementales, hay veces que las partículas elementales están agrupadas como si fueran un

grano de tamaño mayor. Finalmente la microestructura de grano de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos, sin partículas de arcilla.

Según Barrera ejemplo de suelos con microestructura predominantemente matricial, son los suelos expansivos y suelos compactados en el lado húmedo del óptimo. Los suelos que

presentan microestructura de agregados o conectores de arcilla son aquellos suelos colapsables o los que son compactados en el lado seco del óptimo.

El efecto de la succión en las microestructuras del suelo, además de otras variables como la humedad y la densidad del suelo, define el comportamiento del suelo no saturado. Si la succión aumenta la resistencia del suelo aumenta, pero no de forma infinita, y si el mismo suelo se humedece la succión disminuye provocando el colapso o la expansión del suelo depende en la condición de esfuerzos en que se encuentre.

## Pavimento flexible

### Sub-rasante

La sub-rasante es la cimentación de la estructura de pavimento, que va soportar cargas de tránsito para un periodo de diseño y una tasa de crecimiento, estimado por las proyecciones hechas del diseñador para el lugar que se va a realizar el proyecto. Según Moncayo la sub-rasante son los últimos 30 cm de una terracería, de corte o terraplén. La sub-rasante se puede dividir en tres categorías buenas, regulares o pobres, según la granulometría, plasticidad y su valor de CBR. (Véase figura MC6).

CATEGORIAS DE SUBRASANTES

Categoría	Valor Rel. soporte	Suelo típico y su clasificación
Buena	13 a 35	Gravas, grava-arenas, arenas A - 1, A - 2, A - 3. De "GW a SM".
Regular	6 a 12	Limos y arcillas poco plásticas. A - 4, A - 5, A - 6. De "ML a CH".
Pobre	3 a 5	Arcillas muy plásticas. A - 7, CH y Pte.

**Figura MC6.** Clasificación de la sub-rasante por categorías. (Moncayo V., 1987).

Cuando las condiciones de la sub-rasante se encuentran en la clasificación de "pobre", Moncayo recomienda el estudio de la posibilidad económica de quitarla, estabilizarla o colocar sobre ella otra sub-rasante mejor calidad. Un

criterio similar se maneja en la Sub-Dirección de Geotecnia y Materiales del MOPT, en el sentido en cuando es recomendable que se haga una sustitución de la sub-rasante, según el Ing. Hugo Chávez del Departamento de Pavimento, se debe realizar la sustitución de la sub-rasante con valores de CBR inferiores a dos, pero también se debe mejorar o sustituir, si dentro de la carretera existen tramos pequeños en relación del tamaño de la carretera con valores de CBR muy inferiores al resto de la sub-rasante.

Antes de construir la carretera se recomienda tratar la sub-rasante, se debe escarificar y compactar, Moncayo sugiere que según la clasificación de la categoría de tránsito se debe dar un espesar y una compactación mínima, como se muestran en las figuras MC7 y MC8.

COMPACTACION DE LA SUBRASANTE

Categoría de tránsito	Espesor mínimo	% de compactación
1, 2, 3,	15 cm	90 mínimo
4 y 5	30 cm	95 mínimo

**Figura MC7.** Compactación mínima según el tipo de tránsito. (Moncayo V., 1987).

CATEGORIAS DE TRANSITO

Categoría	Descripción
A	Banquetas, plazas y andadores.
B	Calles peatonales.
1	Calles residenciales, estacionamientos de automóviles.
2	Calles residenciales alimentadoras. Pocos autobuses.
3	Avenidas, estacionamientos industriales, regular cantidad de autobuses, calles y estacionamientos de mercados de abastos.
4	Calzadas y calles comerciales con muchos autobuses.
5	Carreteras urbanas, autopistas.

**Figura MC8.** Tipo de carreteras son clasificación de Moncayo. (Moncayo V., 1987).

## Fallas en el pavimento

Cuando se inicia un proyecto en carreteras, se debe tomar en cuenta la conservación de la estructura del pavimento, para que este llegue al



final de su vida útil. Por lo que se debe dar mantenimiento preventivo y correctivo; el mantenimiento preventivo es aquel cuya función es retrasar las fallas del pavimento y el mantenimiento correctivo, se lleva a cabo cuando ya el pavimento fallo, por lo que se debe localizar, identificar y determinar que causo la falla para hacerle las reparaciones convenientes. (Moncayo V., 1987).

Para poder darle a la carretera un adecuado mantenimiento se debe identificar y clasificar las fallas, Moncayo sugiere que se pueden reconocer dos tipos de fallas, esta la falla funcional y la falla estructural. La falla funcional se da cuando el pavimento ha perdido su función inicial o la que fue asignada de antemano. Generalmente se ubica en la carpeta asfáltica, cuando la carpeta esta arrugada, boluda o resbaladiza, no sigue proporcionando confort al conducir. La falla estructural, se puede dar en todas las capas de la estructura del pavimento, se da cuando hay ruptura en la carpeta, esto imposibilita el tránsito, también se puede dar cuando el terraplén que soporta la estructura colapsa. Para poder identificar la falla se necesita hacer estudios de campo y laboratorio por una persona de amplia experiencia, con el fin de decir donde se origino, si es progresiva y el tipo de falla presente. (Moncayo V., 1987).

Un estudio hecho en México se identificó en que parte del proceso, fallan más los pavimentos, se dice que el 15% de las fallas es debido a un mantenimiento inadecuado, el 25% de las fallas es por un inadecuado diseño y el 60% de las fallas es debido a una mala construcción de la carretera. (Moncayo V., 1987).

En Costa Rica, no se lleva un control de cómo empiezan a fallar los pavimentos, tampoco se le da el mantenimiento adecuado, de forma preventiva, si no que generalmente es de forma correctiva. Por medio del MOPT y LanammeUCR, se están dando los primeros pasos en medir el Índice de Regularidad Internacional (IRI), este puede estar influenciado por la deformabilidad de las diferentes capas del pavimento (Barrera et al, 2004).

Badilla en su trabajo expone diversos comentarios sobre la incidencia de un valor de IRI bajo al iniciar la construcción de una carretera. Zaghoul, mencionado por Badilla (2009) establece que, valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio

inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento.

Michael S. Janoff del JMJ Research, mencionados por Badilla, en un estudio realizado en 1988, sobre el efecto de la regularidad inicial sobre el desempeño del pavimento a largo plazo, presenta los siguientes resultados:

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial, tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes 10 años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial, tienen niveles más bajos de agrietamiento para los siguientes 10 años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial, tienen costos anuales medios de mantenimiento más bajos para los siguientes 10 años a la construcción.
- En un periodo de 10 años, los ahorros anuales alcanzan en promedio US\$ 588 /Km carril. Además, se espera que la carretera dure aproximadamente cuatro años más.

Otro aspecto interesante sobre este indicador, IRI, es que si se disminuye esto repercute de forma directa en la vida del pavimento y su mantenimiento, Badilla menciona que en el estudio de la NCHRP 1-31 se estimó que; una mejoría del 50% en la regularidad del pavimento, implica un incremento del 15% en la vida útil del pavimento. En otros estudios hechos en la pista de WestTrack se determinó que, una reducción del 10% en el valor del IRI, resulta en un incremento en el rendimiento del combustible de 1.91 Kilómetro/litro, aproximadamente. (Badilla V. Gustavo, 2009).

## Fallas en carpeta asfáltica

Esta es la que tiene contacto directo con las cargas del tránsito y los efectos ambientales, es el que se le pueden observar más fácil las fallas que presenta. La falla por funcionalidad se presenta por exceso de asfalto, arcilla o humedad. Se puede deformar la carpeta por falta de compactación. Si la cantidad de asfalto es menor a la óptima se da el desgrane de los agregados. La falla estructural se da cuando la mezcla falla por fatiga, ya que el espesor de losa no es el indica. En la carpeta se pueden producir

ondulaciones, grietas aisladas o piel de cocodrilo, en la época lluviosa baches. (Moncayo V., 1987).

## Falla capa base

Esta capa puede fallar por la saturación, el cual expande las arcillas que contenga y haga perder resistencia. También falla por cortante debido al que espesor de la capa no es el indicado. Se deforma de forma permanente ya que en la construcción no se le dio la compactación suficiente. Esto se refleja por la formación de baches y deformaciones en la carpeta asfáltica. (Moncayo V., 1987).

## Falla capa de sub-base y sub-rasante

La capa de sub-base presenta la misma patología que la capa base, a diferencia que el contenido de arcilla en la capa no es tan importante que la base, ya que está en contacto directo a la sub-rasante. Las fallas en estas capas se reflejan por que los baches y las rodadas son profundos. (Moncayo V., 1987).

El fallo en la sub-rasante se da por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o sub-base) bajo la capa de asfalto. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. Puede más bien ser causado por el inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de agua. La deformación ocurre en las capas inferiores más que en las capas de asfalto, Caprara mencionado por Barrera et al.

Es necesario tener en cuenta en la sub-rasante la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo expansivo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre éste, por esta razón, al construir un pavimento hay que intentar al máximo controlar las variaciones volumétricas del mismo a causa de las variaciones en el contenido de agua. (Barrera et al, 2004).

La sub-rasante está expuesta a sufrir cambios en su volumen, lo que causa colapso o expansiones, debido a la succión, Barrera

menciona que el esfuerzo medio y el cambio de succión las variables que esencialmente controlan, para un suelo dado y un grado de compactación, los cambios de volumen. La saturación del suelo afecta la resistencia de este, se han hecho estudios donde la variación del CBR con las condiciones de compactación sigue las tendencias esperables: aumenta con la masa volumétrica y disminuye con el contenido de humedad. (Barrera et al., 2004).

En Israel se hicieron estudios en carreteras, donde Livneh & Ishai (1975), mencionados por Barrera, encontraron la relación que tiene el CBR con la succión del suelo y el límite plástico del suelo. (Ver figura MC9).

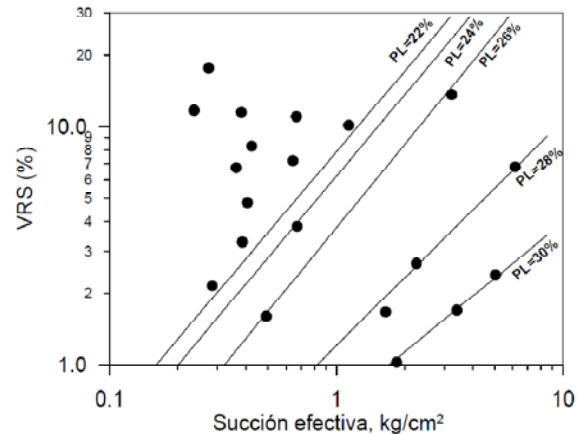


Figura MC9. Relación de CBR y succión efectiva. (Barrera et al., 2004).

## Diseño de la estructura de pavimentos

El diseño es basado del método AASHTO de 1993, para pavimentos flexibles y las modificaciones adaptadas del diseño por parte del MOPT. Por medio de la herramienta de Excel, se logra realizar un programa que integra las variables de diseño y resuelve la ecuación general del diseño del pavimento para determinar los espesores de la estructura de pavimento, el cual se va usar para hacer los diseños necesarios.

El diseño de la AASHTO se basa en la siguiente ecuación:

$$\log_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 \frac{\log_{10}(\Delta PSI)}{0.4 + \frac{4.2 - 1.5}{1094}} + 2.32 \log_{10} M_r - 8.07.$$

Ecuación MC1

Donde

$W_{18}$ , número de cargas de ejes equivalentes, número ESALs.

$Z_r$ , desviación normal estándar debido a una confiabilidad R.

$S_o$ , error estándar combinado.

$SN$ , número estructural.

$\Delta PSI$ , pérdida de serviciabilidad.

$M_r$ , modulo de resiliencia.

Se debe considerar varias variables para el diseño, el periodo de diseño de la carretera, según la siguiente figura.

#### Períodos de diseño

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Figura MC10. Períodos de diseño dada por el Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.

Se tiene que definir la confiabilidad del diseño, esto se refiere al grado de seguridad que el diseño pueda llegar al final de su vida útil (MCDP, 2002), va a depender del valor que se le dé.

#### Niveles de confiabilidad R en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 – 99.9	80 – 99.9
Troncales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	50 – 80

Figura MC11. Confiabilidad R según el tipo de carretera. (MCDP, 2002)

La desviación estándar ( $Z_r$ ), va depender de la confiabilidad que se determinó anteriormente, ver la figura MC12, el cual relaciona las variables.

#### Valores de $Z_r$ en función de la confiabilidad R

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar $Z_r$
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Figura MC12: Valores de  $Z_r$  según la confiabilidad. (MCDP, 2002).

El error estándar combinado  $S_o$ , incluye la desviación de la predicción del tránsito y la desviación del comportamiento del pavimento, el valor que se va usar es de 0,35 para construcciones nuevas.

La serviciabilidad de un pavimento es la capacidad que tiene de servir el tipo y volumen de tránsito al que se diseño, el MCDP recomienda usar para el índice de serviciabilidad inicial para pavimentos flexibles de 4,2 y para índice de serviciabilidad final es de 2,0 para caminos de tránsito menor, definir estos valores es difícil ya que va depender de la construcción de la carretera y las irregularidades de esta, además de la subrasante.

El modulo de resiliencia caracteriza las diferentes capas de la estructura de pavimento bajo cargas dinámicas, este valor se va determinar por medio de correlaciones,

Suelos finos, por general es el valor que toma la sub-rasante

$$M_r = 1500 * CBR$$

Ecuación MC 2

Donde

$M_r$ , modulo de resiliencia en psi.  
 $CBR$ , capacidad de soporte de California en %.

Si  $CBR < 10$ ; dado por el MCDP, 2002.

Para suelos granulares se tiene

$$M_r = 4326 * \ln(CBR) + 241$$

Ecuación MC3

Otra correlación la hace Pablo del Aguila (2007), donde  $M_r$  está dada en  $Kg/cm^2$

$$M_r = k * CBR$$

Ecuación MC4

Donde los valores de k son, de 100 para suelos granulares gruesos, de 110 para suelos

granulares finos y de 130 para suelos finos plásticos.

Para determinar los espesores de la estructura de pavimentos, se realiza de una forma iterativa de la ecuación que correlaciona el número estructural con los espesores como sigue

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_3 * D_3$$

Ecuación MC5

Donde

$a_1, a_2, a_3$ , coeficiente estructural.

$m_2, m_3$ , coeficiente de drenaje.

$D_1, D_2, D_3$ , espesor de las capas del pavimento en pulgadas.

Para calcular los coeficientes estructurales, se hace por medio de las gráficas (MC13, MC14, MC15, MC16) que da el MCDP, como sigue:

Coeficiente estructural a partir del Módulo elástico del concreto asfáltico

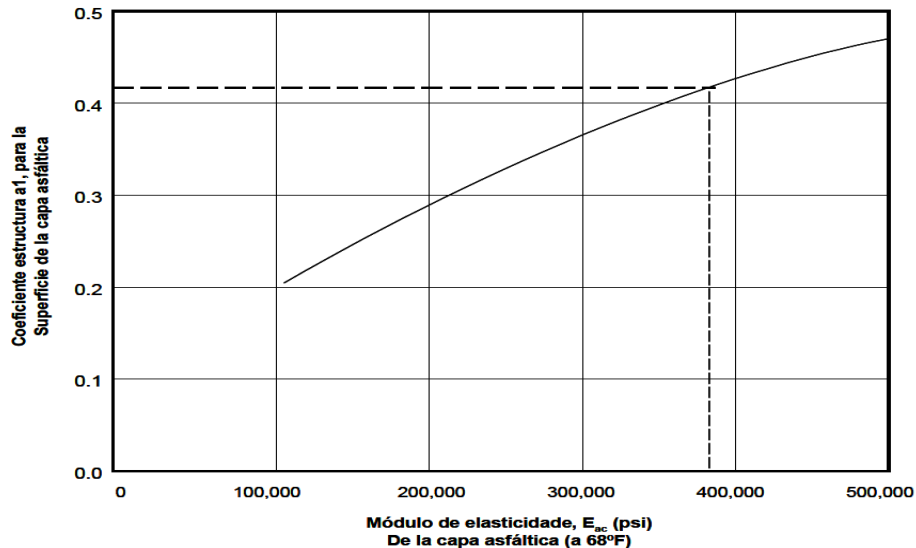
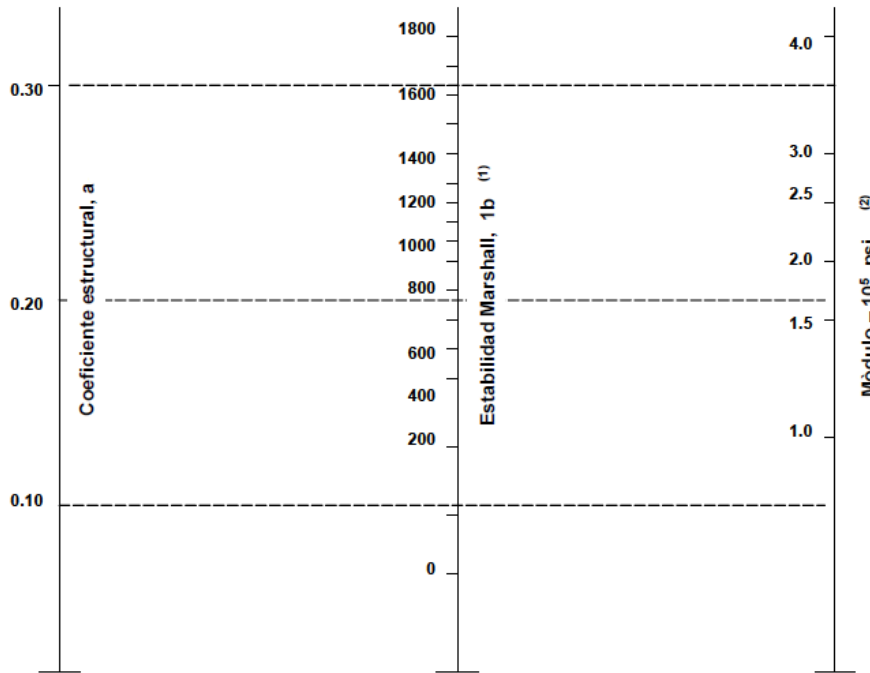


Figura MC13: Coeficiente estructural  $a_1$  del asfalto por el modulo de elasticidad. (MCDP, 2002).

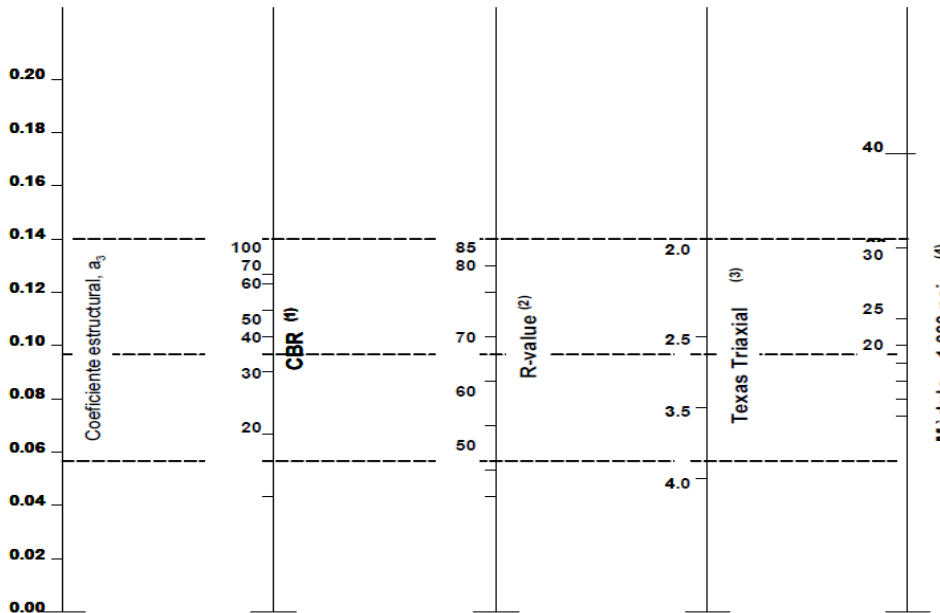
Variación en el coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltica



- (1) La escala deriva por correlación obtenida de Illinois
- (2) La escala derivó en el proyecto NCHRP (3)

Figura MC14: Coeficiente estructural  $a_1$  para la capa de asfalto. (MCDP, 2002).

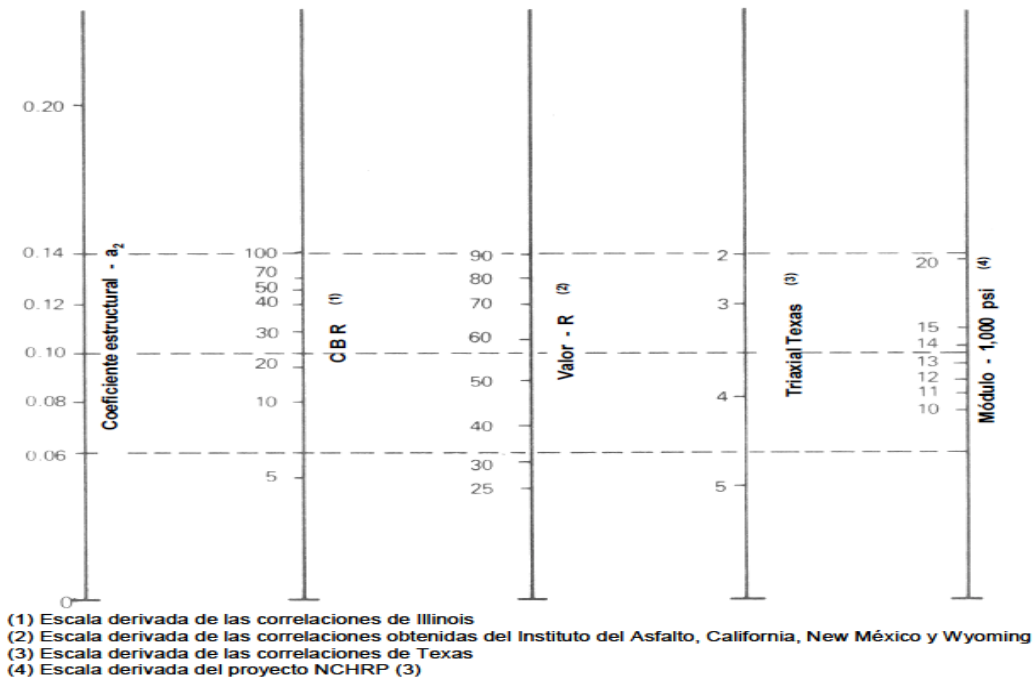
Variación en el coeficiente estructural de la capa de base



- (1) La escala derivó haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) La escala derivó haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de California, New México y Wyoming
- (3) La escala derivó haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Texas
- (4) La escala derivó en el proyecto NCHRP (3)

Figura MC15: Coeficiente estructural  $a_2$ , para capa de base.

**Variación en el coeficiente estructural de la capa de subbase**



**Figura MC16:** Coeficiente estructural a3, para capa de sub-base.

Los coeficientes de drenaje van a ser tomados de las especificaciones de diseño del MOPT, para la capa de base se va tomar un valor de 0,9 y para la capa de sub-base va tomar un valor de 0,8.

Para determinar el espesor de cada capa de la estructura de pavimento se debe resolver las siguientes ecuaciones:

$$D_1 \geq SN_1/a_1$$

Ecuación MC6

$$SN_1^* = a_1 * D_1^*$$

Ecuación MC7

$$D_2 \geq (SN_2 - SN_1^*)/a_2 m_2$$

Ecuación MC8

$$SN_2^* = a_2 * m_2 * D_2^*$$

Ecuación MC9

$$D_3 \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

Ecuación MC10

Los coeficientes con asterisco son resultado de la interacción de las ecuaciones las cuales deben que cumplir la siguiente condición para que las dimensiones sean satisfactorias para el diseño.

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN$$

Ecuación MC11

En la figura MC17 se encuentran los espesores mínimos que recomienda el MCDP, para la carpeta de asfalto y el espesor de la capa base, para niveles de tránsito.

**Espesores mínimos sugeridos**

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 - 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 - 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

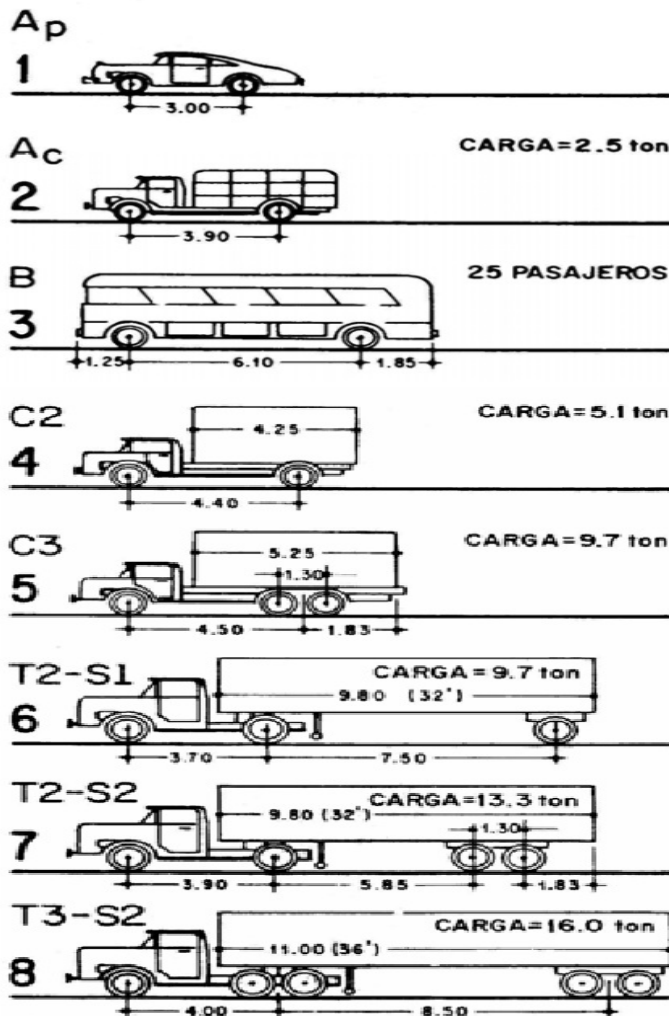
**Figura MC17.** Espesores mínimos de la carpeta asfáltica y capa base. (MCDP, 2002).

# Análisis de tráfico

La determinación de la composición, número de tránsito para el diseño de una carretera es de suma importancia ya que esta va a definir la estructura de pavimento. Son las cargas que se van a transmitir al pavimento. La cantidad de camiones, automóviles que puedan pasar por una carretera es muy variado, al igual que el esfuerzo que puedan ejercer en la estructura de pavimento. Por lo que se adopta, en convertir los esfuerzos de cada tipo de automóvil a esfuerzos equivalentes.

# Factor camión o factor ESALs

Se va identificar el vehículo, el tipo de eje y la carga por eje. Ver figura MC18 y figura MC19, con ellos se va tomar los valores de carga por eje que se usan para determinar el LEF.



EJE	W <sub>VAC</sub>	W <sub>CARG</sub>
1	0.9	1.0
2	0.9	1.0
3	—	—
Σ	1.8	2.0
1	1.2	1.6
2	1.2	3.3
3	—	—
Σ	2.4	4.9
1	3.0	4.2
2	7.0	8.3
3	—	—
Σ	10.0	12.5
1	1.5	2.5
2	2.7	6.8
3	—	—
Σ	4.2	9.3
1	1.7	2.6
2	5.2	14.0
3	—	—
Σ	6.9	16.6
1	2.5	3.0
2	3.6	8.0
3	3.0	7.8
Σ	9.1	18.8
1	3.5	4.0
2	4.0	8.5
3	3.8	12.1
Σ	11.3	24.6
1	3.5	3.9
2	5.4	13.0
3	5.0	13.0
Σ	13.9	29.9

Figura MC18. Tipo de vehículo y carga de ejes. (Fuente: Presentación, Ing. José R. Harris).



Tipo de Vehículo	Tipo de eje del tractor			Tipo de eje del semiremolque			Total Toneladas	
	Eje simple direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje Simple	Doble rueda		Triple rueda
C2	5.00	10.00					15.00	
C3	5.00		16.50				21.50	
C4	5.00			20.00			25.00	
T2-S1	5.00	9.00			9.00		23.00	
T2-S2	5.00	9.00				16.00	30.00	
T2-S3	5.00	9.00				20.00	34.00	
T3-S1	5.00		16.00		9.00		30.00	
T3-S2	5.00		16.00			16.00	37.00	
T3-S3	5.00		16.00			20.00	41.00	
Otros	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Variable	

Figura MC19: Límites de peso (MCDP 2002).

Las tablas que se encuentran en Anexo A, se determina el valor LEF, el valor del factor de camión se va determinar para un solo vehículo, que después, este se utilizará para la cantidad total de vehículos del mismo tipo. Entonces, la cantidad de ejes del mismo tipo, simple, tándem o tridem, se multiplica por el respectivo valor de LEF, el cual va dar un valor de ESALs, luego estos se suman y se divide por la cantidad de vehículos, dando el valor de Factor Camión, como se muestra en la ecuación MC12.

$$TF = \frac{\sum ESALs}{N^{\circ} Camiones}$$

Ecuación MC12

Donde

$TF$ , factor camión o factor ESALs.

$\sum ESALs$ , suma de los ESALs de los tipos de ejes de un vehículo.

$N^{\circ} Camiones$ , número de vehículos, se determinó como 1.

## Factor de crecimiento

El factor de crecimiento, determina cuanto crece la tasa anual vehicular durante los años de diseño, esta puede ser distinta para cada tipo de vehículo. Con el periodo de diseño y la tasa de crecimiento se introduce a la figura MC20, donde se obtiene el factor de crecimiento.

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Figura MC20: Factores de crecimiento de tránsito (MCDP 2002).

## ESALs de diseño

Para calcular los ESALs de diseño, se determina el tránsito de diseño, esto es multiplicar la cantidad de vehículos de cada tipo por el factor



de crecimiento. Luego, se multiplica por el factor camión y se sumen todos los ESALs.

## ESALs por carril de tránsito

Para poder determinarlo se tiene que tomar en cuenta el factor de dirección y el factor de carril.

Número de carriles en ambas direcciones	LD <sup>10</sup>
2	50
4	45
6 o más	40

Figura MC21: Factor de distribución por carril (MCDP 2002).

Número de carriles en una sola dirección	LC <sup>11</sup>
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Figura MC22: Factor de distribución de carril.

## Procedimiento estadístico para la creación de escenarios climáticos.

De los primeros pasos que se deben realizar son identificar y recolectar la información de precipitación de las estaciones meteorológicas, cercanas al lugar de estudio, las cuales deben ser representativas. De acuerdo cómo se presente la información de los datos de precipitación, se debe pasar la precipitación de forma mensual, si este no es el caso se procede a determinar tres escenarios, según los parámetros dados por el Instituto Meteorológico Nacional (Costa Rica).

Lo que sugiere el trabajo de Villalobos y Retana es agrupar los datos en tres escenarios, seco, normal y lluvioso. Para poder determinar los escenarios se debe calcular la precipitación anual, la cual es la suma de todas las precipitaciones de cada mes del año, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para que haya confiabilidad en los datos, la

información tuviera que haber sido de un mínimo de 30 años.

En el caso del proyecto no se puede tener un registro tan amplio como el que sugiere la OMM, los datos que proporcionó el IMN de las estaciones cercanas al lugar en estudio cuenta con registros menores, aunque dos estaciones cuentan con registros de más de 30 años, el periodo de análisis va ser de 12 años, ya que todas las estaciones cumplen con este registro.

Ya calculado la precipitación anual, se procede a determinar si los datos tienen una distribución normal o no. Si estos tienen una distribución normal, los escenarios se dividirán, el seco, como aquellos datos donde el promedio va ser menor que la primera desviación, el normal, los datos se van a encontrar entre un rango de la primera y segunda desviación, y el lluvioso donde los datos promedios van a ser mayores que la segunda desviación.

Pero si los datos no cuentan con una distribución normal, se dividirán los escenarios como seco, a los datos que son menores al primer tercil, normal a los que están entre el primer y segundo tercil, y el escenario lluvioso a los datos mayores al segundo tercil.

Agrupados los datos según el escenario, se procede a determinar la precipitación promedio de cada mes de los grupos de años que cumplen los criterios anteriormente expuestos, así tener el comportamiento particular de cada escenario.

Cabe mencionar que el pronóstico que se hace es meramente una probabilidad del panorama más probable, pero estos pueden ser afectados por “diversas fuerzas conocidas de origen oceánico atmosférico, que interfieren el comportamiento normal de la lluvia (monto, magnitud y distribución) y “obligan” a comportamientos extremos y cíclicos. Estas fuerzas obedecen a la estacionalidad, sistemas de altas y bajas presiones, domos térmicos oceánicos, huracanes, el ENOS, la Oscilación Cuasibienal, entre otros.” (Villalobos & Retana) Por lo que el comportamiento de las lluvias pueden ser extremos a lo pronosticado.

# Completar datos de precipitación y análisis del área del proyecto

La información que proporcionó el IMN de los datos de precipitación, para un registro de 12 años, de las estaciones cercanas al proyecto, contó con datos faltantes, por lo que se tuvieron que completar. Existen varios métodos para completar registros como, el promedio aritmético, relación de varianza, correlación lineal, análisis de doble masa entre otros, los datos faltantes se van completar por medio de la proporción normal.

Este método analiza los datos dentro de la misma estación y toma la información de los meses existentes para relacionarlo para los meses que hacen falta. Se tiene entonces que, un mes donde el dato hace falta dentro un determinado año, es dividido por el promedio de los datos de ese mismo mes, pero para los datos de todo el registro, es igualado a la suma de todos los datos del año en estudio dividido entre el promedio anual de todo el registro. Se determina para cada mes que haga falta del mismo año, dando así origen a un sistema de ecuaciones, si es más de un mes que el dato de precipitación que haga falta. Se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{X_i}{N_i} = \frac{\sum X_i + \sum X_j}{P}$$

Ecuación MC13

Donde

$X_i$ , dato que hace falta (mes  $i$ ) dentro de un mismo año.

$N_i$ , promedio de precipitación mensual en el mismo mes faltante, de todo el registro.

$\sum X_i$ , suma de los datos faltantes dentro de un mismo año.

$\sum X_j$ , suma de los datos que si se tiene registro dentro de un mismo año.

$P$ , precipitación promedio anual para todo el registro de datos.

## Análisis de la precipitación en un área

La carretera en estudio cubre un área relativamente grande, además las estaciones meteorológicas no se encuentran cerca del proyecto, por lo que se hace necesario identificar secciones que van a tener características climatológicas medias similares, para esto se va utilizar el método de Thiessen mejorado.

Los métodos de polígonos de Thiessen y las isohietas, lo que persiguen es estimar la precipitación media de la cuenca. Por medio del método de Thiessen mejorado, el cual combina los dos métodos anteriores; es posible encontrar de forma seccionada, el área en estudio, y muy buena estimación, la precipitación media. Esto es necesario, ya que el análisis que se quiere hacer para determinar la saturación del suelo, va a depender de características del suelo.

## Método

1. Se requiere delimitar el área en estudio. Esto va a depender de la topografía del lugar, la línea que lo limita sigue las partes más altas que en cierran el sitio del proyecto. (Chereque Wendor, 1989)
2. Se unen las estaciones con una línea recta formando triángulos, los cuales deben tener las distancias más cortas. Luego se traza la mediatriz a cada segmento del triángulo. Formando los polígonos de Thiessen.
3. Hay que trazar las curvas de isohietas, las cuales son líneas con la misma precipitación, interpolando entre estaciones, tomando en cuenta la topografía del terreno.
4. Se determina la precipitación en cada polígono operado por las isohietas de la siguiente forma. (Chereque Wendor, 1989).

$$h = \sum h_m \frac{a}{a_T}$$

Ecuación MC14.

Donde:

$h$ , precipitación sobre el polígono.

$h_m$ , valor aritmético de la precipitación entre las líneas de isohietas.

$a$ , área entre isohietas.

$a_T$ , área del polígono.

## Determinación de la saturación del suelo debido a la precipitación.

Para determinar la saturación del suelo se deben conocer ciertas características del suelo esto es, la gravedad específica, la densidad seca del suelo y la humedad.

En cada mes del año la humedad del suelo cambia, de acuerdo con la precipitación que hubo en cada mes. Con los datos de la precipitación mensual, de varios años, del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se formará un modelo de pronóstico de los años más lluviosos que afectan la zona en estudio y se determinará la saturación del suelo con dichos datos.

Para calcular la saturación se usará la siguiente ecuación.

$$S = \frac{G_s w}{e}$$

Ecuación MC15

Donde

$S$ , saturación.  
 $G_s$ , gravedad específica.  
 $w$ , humedad.  
 $e$ , relación de vacíos.

Y para calcular la relación de vacíos.

$$e = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}$$

Ecuación MC16

Donde

$e$ , relación de vacíos.  
 $\gamma_w$ , densidad del agua a 4°C.  
 $\gamma_d$ , densidad seca del suelo.

Para calcular la humedad del suelo debido a la precipitación ocurrida en cada mes, se utilizará la metodología usada por Schosinsky y Losilla

(1999), en el artículo "Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos". Se determinara la humedad inicial y final de cada mes, se promediará y este va ser el dato que se usará en la ecuación MC15.

Para determinar la humedad inicial según Schosinsky (1999), se puede hacer de dos formas, una midiendo en campo directamente la humedad para cada mes, o calculando la evapotranspiración potencial para cada mes, la cual se compara con la precipitación que infiltra mensualmente, esta debe ser mayor. Deberá fijarse los meses consecutivos que cumplan la condición descrita, el mes siguiente a estos meses, tendrá una humedad inicial igual a la capacidad de campo. Capacidad de campo es la mayor humedad de un suelo antes de llegar a la saturación.

Obtenido la humedad inicial se procede a calcular la humedad final del mes, y esta a su vez va ser la humedad inicial del siguiente mes así sucesivamente. El cálculo para determinar la humedad del suelo al final del mes, depende de la humedad disponible del suelo, el punto de marchitez permanente y la evapotranspiración real. La humedad final va estar condicionada según como se presenta.

Si

$$wHD + PM - ETR < CC$$

Entonces

$$wHSf = wHD + PM - ETR$$

Ecuación MC17

Pero si

$$wHD + PM - ETR \geq CC$$

Entonces

$$wHSf = CC$$

Ecuación MC18

Donde

$wHSf$ , humedad final de suelo en el mes.  
 $wHD$ , humedad disponible dada en mm/mes.  
 $PM$ , punto de marchitez permanente.  
 $ETR$ , evapotranspiración real.  
 $CC$ , capacidad de campo.

La humedad disponible, es aquella humedad que puede tomar las raíces de las plantas (Schosinsky & Losilla, 2006) y se calcula.

$$wHD = HSi + Pi - PM$$

Ecuación MC19

Donde

$wHSi$ , humedad inicial del mes.  
 $Pi$ , precipitación que infiltra.

La cantidad de agua que infiltra en el suelo después de que una parte se quede en el follaje de los árboles y lo que es debido a la condición del suelo, pendiente, textura y la cobertura vegetal es el factor  $Pi$ , el cual viene expresado.

$$Pi = Ci(P - Ret)$$

Ecuación MC20

Donde

$Ci$ , coeficiente de infiltración.  
 $P$ , precipitación mensual. Proviene del cálculo de los diferentes escenarios, según los datos del IMN.  
 $Ret$ , retención por follaje.

El coeficiente de infiltración es la suma de diversos factores los cuales contemplan la pendiente del terreno, la textura y la cubierta vegetal, según se ve en la siguiente ecuación.

$$Ci = k_p + k_v + k_{fc}$$

Ecuación MC21

Donde

$k_p$ , fracción que infiltra por efecto de la pendiente.  
 $k_v$ , fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal.  
 $k_{fc}$ , fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo.

Los factores anteriores se determinarán de la siguiente figura.

Por textura de suelo:		$K_{fc}$
Arcilla compacta impermeable		0,10
Combinación de limo y arcilla		0,20
Suelo limo arenoso no muy compacto		0,40
Por pendiente:		$K_p$
Muy plana	0.02%-0.06%	0,30
Plana	0.3%-0.4%	0,20
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2%-7%	0,10
Fuerte	mayor de 7%	0,06
Por cobertura vegetal		$K_v$
Cobertura con zacate menos 50%		0,09
Terrenos cultivados		0,10
Cobertura con pastizal		0,18
Bosques		0,20
Cobertura con zacate más de 75%		0,21

**Figura MC23:** Coeficientes de infiltración (Schosinsky & Losilla, 2000).

Retención del agua en el follaje es un factor que se debe considerar, ya que afecta la cantidad de agua que llega al suelo, se considera que el 12 por ciento de la lluvia es retenido por el follaje, pero en lugares donde la vegetación es más abundante se puede considerar que es un 20 por ciento de la retención de la precipitación mensual. (Schosinsky & Losilla, 2006) Se tiene.

$$Ret = PCfo$$

Ecuación MC22

Donde

$Cfo$ , coeficiente de retención de follaje.

Se debe tomar en cuenta que si la precipitación es menor o igual que 5mm/mes, el valor de  $Ret$  va ser igual a la precipitación, si la precipitación es mayor que 5mm/mes y el producto de la ecuación MC22 es menor a 5mm/mes, el valor de  $Ret$  va ser de 5mm/mes, pero si el producto de la ecuación MC22 es mayor o igual que los 5mm/mes el valor que tomará  $Ret$  es el de la ecuación MC22.

Los parámetros de punto de marchitez permanente y la capacidad de campo del suelo, se determinarán según los valores del siguiente

cuadro, el cual considera el tipo de suelo, dando valores en rangos, se trabajará con el medio de estos valores.

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

Figura MC24: Valores de punto de marchitez permanente y capacidad de campo (Schosinsky & Losilla, 2006).

La evapotranspiración, es el fenómeno que se da cuando el suelo se encuentra en la condición de capacidad de campo, el cual permite que las plantas absorban agua, además de la que se evapora en el ambiente y la que es absorbida por el suelo. La evapotranspiración real que se da en mm/mes, se determina.

$$ETR = ETP \frac{(c1 + c2)}{2}$$

Ecuación MC23

Donde

*ETP*, evapotranspiración potencial.  
*c1*, coeficiente de humedad máximo.  
*c2*, coeficiente de humedad mínimo.

Pero debe cumplir con las siguientes condiciones, si el valor dado por la ecuación MC22 es menor o igual a la humedad disponible (*wHD*), la

evapotranspiración real (*ETR*) es igual a la ecuación MC23, pero si el valor es mayor, *ETR* va ser igual a la humedad disponible.

La evapotranspiración potencial va depender de la temperatura media mensual del sitio en estudio, además de la cantidad de horas de luz solar. (Schosinsky & Losilla, 2006).

$$ETP = (8,10 + 0,46T)Ps$$

Ecuación MC24

Donde

*ETP*, evapotranspiración potencial.  
*T*, temperatura media según datos del IMN, dados en grados Celsius.  
*Ps*, porcentaje de horas luz solar medio mensual, con respecto al año. (%)

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
%	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10

Figura MC25: Porcentaje de luz solar en latitud 10° norte (Schosinsky & Losilla, 2006).

Se debe tener en cuenta que el cálculo de evapotranspiración, también se utiliza para determinar la humedad inicial, este se compara con la precipitación media mensual.

El coeficiente de humedad máxima no considera la evapotranspiración, el cual alcanza la humedad más alta en el mes, en cambio del coeficiente de humedad mínimo que si toma en cuenta la evapotranspiración. Se tiene

$$c1 = \frac{(wHsi - PM + Pi)}{(CC - PM)}$$

Ecuación MC25

$$c2 = \frac{(wHsi - PM + Pi - ETR1)}{(CC - PM)}$$

Ecuación MC26

Donde

*ETR1*, evapotranspiración debido al coeficiente de humedad máximo.

Se calcula en la siguiente ecuación.

$$ETR1 = c1ETP$$

Ecuación MC27

Los valores de humedad están dados en mm de agua, para convertirlos en un porcentaje de suelo seco, según Schosinsky, va a depender de la profundidad de las raíces de la vegetación predominante del lugar, en la figura MC26 se encuentra algunas profundidades de raíces, como se describe en la siguiente ecuación.

$$wHs(\%) = \frac{mmA * 100}{p * \gamma_{ad}}$$

Ecuación MC28

Donde

$wHs(\%)$ , porcentaje de humedad en peso de suelo seco.

$mmA$ , milímetros de agua.

$p$ , profundidad de raíces, se da en mm.

$\gamma_{ad}$ , densidad aparente del suelo, se da en g/cm<sup>3</sup>.

PROFUNDIDAD DE RAÍCES	
Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Cítricos	1,20-2,0
Zacate	0,3-0,5
Bosques	2,0-3,0

**Figura MC26:** Profundidad de raíces promedio (Schosinsky & Losilla, 2006).

## Diseño probabilístico

Para el diseño del pavimento se determinará por medio del análisis probabilístico, la dimensión de la estructura, el método que se usará es el de Emilio Rosenblueth en 1975, con ayuda de lo hecho en el trabajo "Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y en la estabilidad de taludes" de Enrique Valverde en el 2010.

Seguidamente se explicará en que consiste el método, primero se tiene que identificar la o las variables independientes, con los datos de las variables se calcula el promedio y la desviación estándar. Con ellos se define las funciones de probabilidad del modelo como sigue.

$$S_{++} = g[(\mu_{x1} + \sigma_{x1}), (\mu_{x2} + \sigma_{x2})]$$

Ecuación MC29

$$S_{+-} = g[(\mu_{x1} + \sigma_{x1}), (\mu_{x2} - \sigma_{x2})]$$

Ecuación MC30

$$S_{-+} = g[(\mu_{x1} - \sigma_{x1}), (\mu_{x2} + \sigma_{x2})]$$

Ecuación MC31

$$S_{--} = g[(\mu_{x1} - \sigma_{x1}), (\mu_{x2} - \sigma_{x2})]$$

Ecuación MC32

Donde

$S$ , espesor de la estructura de pavimento, debido a combinaciones.

$\mu_{x1}, \mu_{x2}$ , promedio de los datos de las variables definidas.

$\sigma_{x1}, \sigma_{x2}$ , desviación estándar de las variables definidas.

Luego se realiza una serie de combinaciones, las que relaciona el número de variables y la relación existente entre variables como sigue.

$$P_{++} = P_{--} = \frac{1}{2^N} (1 + \rho_{1,2})$$

Ecuación MC33

$$P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{2^N} (1 - \rho_{1,2})$$

Ecuación MC34

Donde

$N$ , número de variables.  
 $\rho_{1,2}$ , relación existente entre variables, si son dependientes toma un valor de 1, si son independientes toma un valor de 0,75.

Se calcula el espesor esperado correlacionando las variables definidas.

$$E[S] = P_{++}S_{++} + P_{+-}S_{+-} + P_{-+}S_{-+} + P_{--}S_{--}$$

Ecuación MC35

Se debe calcular la varianza del diseño y el índice de confiabilidad, este último va depender su cálculo si los datos tengan una distribución log-normal o normal, por que se definen las siguientes ecuaciones.

$$Var[S] = E[S^2] - (E[S])^2$$

Ecuación MC36

$$\beta = \frac{|\ln(S_c) - \mu_N|}{\sigma_N}$$

Ecuación MC37

Donde

$$\mu_S = E[S]$$

Ecuación MC38

$$\mu_N = \ln(\mu_S) - \frac{1}{2} \sigma_N^2$$

Ecuación MC39

$$\sigma_N = \sqrt{\ln(1 + V_S^2)}$$

Ecuación MC40

$$V_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S}$$

Ecuación MC41

$$\sigma_S = \sqrt{Var[S]}$$

Ecuación MC42

Donde

$\mu_S$ , espesor de la estructura de pavimento general.

$\sigma_S$ , desviación estándar del espesor de pavimento.

$V_S$ , coeficiente de varianza.

$\sigma_N$ , desviación estándar de las variables.

$\mu_N$ , promedio de las variables.

$\beta$ , índice de confiabilidad para una distribución log-normal.

$S_c$ , Espesor crítico tomado para determinar la confianza.

Para una distribución normal hay tomar en cuenta lo siguiente.

$$\beta = \frac{|S_c - \mu_S|}{\sigma_S}$$

Ecuación MC43

Donde

$$\mu_S = E[S]$$

Ecuación MC44

$$\sigma_S = \sqrt{Var[S]}$$

Ecuación MC45

## Determinación de rendimientos de mano de obra

### Estimación de la productividad

La técnica que se va utilizar para determinar la productividad de los procesos por medir, es el muestreo del trabajo, esta permite identificar problemas asociados a la baja productividad, los cuales posteriormente pueden ser corregidos reduciendo costos de operación y mano de obra.

El muestreo de trabajo, es de aplicación rápida, es también una de las técnicas más usadas por su bajo costo. Además por sus numerosas observaciones de forma aleatoria permiten indagar, como se gasta el tiempo en sus diferentes actividades, el cual da información útil y confiable.

Para poder estimar la productividad de la mano de obra en alguna actividad, ésta se va a basar por medio de observaciones del trabajo productivo y el trabajo no productivo. Pero para que estas observaciones tengan alguna validez estadística, es necesario determinar el grado de

confianza y el error aceptado para la muestra. Por lo que se debe determinar el tamaño de la muestra o el número de observaciones, como se muestra en la siguiente ecuación MC42.

$$n = k_{\alpha/2}^2 \frac{p(1-p)}{I^2}$$

Ecuación MC46

Donde

$k_{\alpha/2}$  = valor de la variable normal estándar para un nivel de confianza.

$p$  = proporción de ocurrencia de un evento (% trabajado).

$I$  = error aceptado.

$\alpha$  = nivel de confianza.

$n$  = número de observaciones.

Se debe tomar en consideración, la identificación del proceso y a los operarios que van a participar en las observaciones, como las herramientas que se van a utilizar y las condiciones del clima, ya que estos factores van afectar la productividad.

Se va definir que la muestra va tener un nivel de confianza de 95%, con un error aceptado del  $\pm 5\%$ . Primero se tiene que obtener el parámetro  $p$ , el cual es el porcentaje de casos que se estaba trabajando, para esto se va hacer un muestreo pequeño para determinar dicho porcentaje.

El apéndice 2 muestra como se tomarán esos datos; para determinar el factor “ $p$ ”, se tomó de forma arbitraria el número de observaciones, esto va a depender de la magnitud de la obra que se va muestrear, además se van a determinar las actividades que no son parte del trabajo, y se categorizará como tiempo no productivo, ejemplo tomar café, almuerzo, fumar, etc. Se debe tomar en cuenta que estas actividades se van a determinar a lo largo de la jornada de trabajo, no solamente en el periodo que se toman los datos de la tabla (1).

Listo los datos, se procede a calcular el número de observaciones (ecuación MC46) que se requieren para que los datos se estimen con los parámetros de confianza y error aceptado, previamente fijados.

Cuando se determina la cantidad de observaciones, el ciclo de observación, las tareas dentro las actividades productivas y no productivas, se confecciona una tabla, ver apéndice 2. Terminada la medición, se debe calcular la desviación de los datos como:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

Ecuación MC47

Donde:

$\sigma_p$ , desviación estándar de los datos.

Y determinar el error asociado en el nivel de confianza, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$l = k_{\alpha/2} \sigma_p$$

Ecuación MC48

Donde:

$l$ , límite aceptable de error.

Se debe considerar que las observaciones deben ser hechas de forma aleatoria, para impedir manipulación en la medición, no se ha determinado de forma precisa como determinar los periodos de observación, esto va depender de la persona que está haciendo el estudio. Se encontró en la literatura, un método que utiliza una tabla de números aleatorios (ver apéndice 2), consiste en que se determina un periodo de una cantidad de minutos, valorando la jornada de trabajo y la cantidad de observaciones que se van hacer, y por medio de los números que se obtienen de la tabla se va determinando los periodos de observaciones.

## Rendimiento de la mano de obra

El rendimiento es la cantidad de horas hombre que se ocupa para llevar a cabo un determinado volumen de trabajo. Se ocupa definir las herramientas que se van a utilizar, la cantidad de trabajadores y categorizarlos, además de las condiciones climáticas que van a predominar.

Se va a determinar el tiempo que requiere cada trabajador, según su categoría, para realizar la actividad y el volumen de trabajo hecho; luego se identifica y se mide el tiempo que se consume en otras actividades, esto se realiza varias veces. La toma de datos se puede realizar como se observa en el apéndice 2. Obtenidos los datos se procede a determinar el rendimiento, como sigue:



$$R = \frac{tN}{V}$$

Ecuación MC49

Donde:

$R$ = rendimiento de la mano de obra en horas-hombre/unidad.

$t$ = tiempo de duración de la actividad.

$N$ = cantidad de trabajadores según su categorización.

$V$ = volumen de trabajo realizado.

Se debe aclarar, el tiempo que se utiliza en la formula anterior, es el tiempo neto que se utilizó para hacer determinado trabajo, los tiempos que se utilizaron en otras actividades se toman en cuenta, con el factor de incremento, explicado más adelante.

Se aplica la ecuación MC48, para varias muestras de la misma actividad, con el mismo personal y herramientas, para que llegue a ser comparable los resultados. Luego se procede al proceso estadístico, primero se determina la media aritmética de las mediciones.

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{i}$$

Ecuación MC50

Donde:

$\bar{R}$ , es el promedio de los rendimientos.

$i$ , cantidad de muestras realizadas.

Con la siguiente ecuación se determina la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los datos, este valor permite identificar en promedio, cuanto los datos se alejan del punto medio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{i}}$$

Ecuación MC51

Luego se determina el coeficiente de variación ( $CV$ ), lo que indica es cuanto se aleja la desviación estándar de la media aritmética, entonces:

$$CV = \sigma / \bar{R}$$

Ecuación MC52

Ya obtenido el rendimiento, se le debe aplicar un factor de incremento, lo que considera es aquel tiempo no productivo, por ejemplo recibir instrucciones, almuerzo, fumar entre otras. Se calcula de la siguiente forma y se da en porcentaje.

$$fi = \frac{tc}{hd - tc} \times 100$$

Ecuación MC53

Donde:

$fi$ , factor de incremento.

$tc$ , tiempo gastado en otras actividades.

$hd$ , horas de trabajo (horas de la jornada de trabajo).

Este factor se le aplica al rendimiento, como incremento en porcentaje. Luego se procede a construir un cuadro donde se tabule la información del rendimiento obtenido para cada actividad que se le haga la medición.

# Metodología

Se va a tomar como referencia las normas ASTM, AASHTO y la práctica común usada por los técnicos del laboratorio del MOPT.

Se anexará el equipo y herramientas que se utilizaron para hacer las pruebas tanto de laboratorio como de campo, haciendo una breve descripción del mismo.

El lugar en que se hizo el estudio, es una carretera de ruta cantonal, designada por el ingeniero Hugo Chávez, tutor del proyecto, ya que es uno de los proyectos activos del MOPT para la facilidad de hacer las pruebas.

Se hace el muestreo en campo, la carretera se divide en cuatro estaciones, procurando que cada uno se distancie por lo menos 1000 metros, se extrae un aproximado de 240Kg de material. Seguidamente se muestran algunas imágenes del sitio de extracción del material.



**Figura 1M.** Estaciones donde se tomaron el material para las pruebas de laboratorio.

Los técnicos Miguel García y Alex Guerrero, tienen bastante experiencia en el muestreo, por medio de la inspección visual determinan cuál es el material “virgen” al que se le deben hacer las pruebas para que estas representativas del lugar que se está estudiando. Generalmente se busca un lugar al costado de la carretera, donde se observa que no existe relleno por depósito de

material cuando se construyó la carretera y no esté en un talud. Los técnicos buscan lugares donde se encuentra expuesto el terreno para comparar los suelos y así determinar el suelo que se debe extraer para el análisis.

Determinado el lugar y la profundidad de la excavación, se procede a sacar un aproximado de ocho sacos de material. En condiciones normales se sacan solamente dos sacos de material.

## Preparación del material

El material que se extrae es llevado al laboratorio para su preparación inicial antes de realizarle algún tipo de prueba. Este consiste en secar el material en hornos o al aire libre, después de 24 horas al horno, se le da una inspección visual para ver que tan seco está el material y se determina si se saca o se deja por más tiempo. Al sacarlo del horno se procede a deshacer los grumos y pasar el material por el tamiz número cuatro. El material tanto pasando como el retenido de la malla número cuatro es almacenada y guardada en cajones, listo para la utilización de las diferentes pruebas.



Figura 2M. Secado y almacenamiento del material traído de campo.

## Límite líquido, plástico e índice de plasticidad del suelo

### Designación

AASHTO T89-02 y T90-70  
ASTM D423-66 y D424-59

Los procedimientos se realizaron conforme con las normas estándar.

### Cálculos

Se grafica los golpes versus la humedad, se determina la recta de mejor ajuste y se lee la humedad a los 25 golpes. Este va ser el límite líquido. El límite plástico va ser el ponderado de las humedades de las tres muestras. Con esto se determina el índice de plasticidad, el cual es la diferencia entre el límite líquido y el plástico.



Figura 3M. Máquina de Casagrande, bastones y muestras de humedad.

## Análisis granulométrico del suelo

### Designación:

ASTM D422-63

Los procedimientos se realizaron conforme a las normas estándar.

### Cálculos

Se pesa el material retenido en cada malla, se calcula el porcentaje de material retenido y pasando. Se grafican los resultados en una escala semi-logarítmica, el porcentaje pasando versus el tamaño de la partícula de suelo.



Figura 4M. Lavado de material pasando la malla 200 y tamizaje del retenido.

## Prueba de Proctor estándar

### Designación

AASHTO T99-01  
ASTM D698-00

Los procedimientos se realizaron conforme a las normas estándar.

### Cálculo

Se determina la densidad de la siguiente forma:

$$\gamma_h = \frac{(W_m - W_{mh})}{V_m}$$

Ecuación 1M.

Donde:

$\gamma_h$ , densidad humedad del material.  
 $W_m$ , peso del molde sin collarín.  
 $W_{mh}$ , peso del molde y la muestra húmeda.

$V_m$ , volumen del molde.

Para determinar la densidad seca del material se calcula de la siguiente forma:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{(1 + w)}$$

Ecuación 2M.

Donde:

$\gamma_s$ , densidad seca del material.  
 $w$ , humedad del material expresada en decimales.

Para cada punto se determina la humedad de cada probeta, luego se grafica la humedad versus la densidad, se supone que la gráfica forma una campana cóncava hacia abajo se puede ajustar con una línea de tendencia como polinomio de segundo grado. La humedad óptima se puede determinar derivando la ecuación de línea de tendencia y así también determinar la densidad seca máxima.

## Gravedad específica de los suelos

### Designación

AASHTO T100-03  
ASTM D854-00

Los procedimientos se realizaron conforme a las normas estándar.

### Cálculos

Cuando no se utiliza agua destilada, es necesario construir una curva de calibración densidad versus la temperatura, esta curva no es necesaria si la densidad del agua corriente tiene un error menor que 0,001 con la densidad de agua destilada a la misma temperatura. Generalmente en los cálculos que involucra la gravedad específica se hacen a los 20°C. Por lo que el dato de la gravedad específica cuando se determina a

otra temperatura debe hacerse la corrección respectiva.

La gravedad específica se calcula como:

$$G_s = \alpha \left( \frac{W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}} \right)$$

Ecuación 3M.

Donde:

$G_s$ , gravedad específica.

$W_s$ , peso del material secado al horno al finalizar la prueba.

$W_{bw}$ , peso del picnómetro con agua.

$W_{bws}$ , peso del picnómetro con agua y material.

$\alpha$ , factor de corrección de temperatura.

El factor de corrección de temperatura se calcula de la siguiente forma:

$$\alpha = \gamma_T / \gamma_{20^\circ\text{C}}$$

Ecuación 4M.

Donde:

$\gamma_T$ , densidad del agua a la temperatura que se hizo el ensayo.

$\gamma_{20^\circ\text{C}}$ , densidad del agua a los 20 grados, tomado de tablas para agua destilada y tomado de la curva de calibración.



**Figura 5M.** Se prepara 100 g de material, se bate con agua y saca los vacíos.

## Método de sub-compactación (Ladd)

### Procedimiento para la preparación de muestras de CBR

El método de sub-compactación asegura la conformación de probetas homogéneas, lo cual es importante ya que permite controlar las condiciones de la muestra. “Además, que disminuye la segregación en limos y arenas bien graduadas, también permite reproducir pesos específico seco.” (R. S. Ladd, 1978).

Las muestras que se quiera reconstruir para la prueba de CBR, tienen que seguir ciertas condiciones, una es que se debe preparar al 95% del proctor óptimo, debe mantener una relación de vacíos para las cantidad de muestras que se van a preparar, variando el porcentaje de saturación.

Ya con las muestras conformadas a una densidad y relación de vacíos constantes, se fallan las probetas en CBR, luego se gráfica saturación versus CBR. A continuación se va explicar cómo conformar las muestras para las condiciones antes mencionadas, variando los métodos para la prueba de CBR según AASHTO T193-99 y ASTM D1883-07, aparte del método de sub-compactación de Ladd.

Datos previos para la prueba, debe tenerse la información del proctor estándar, en este caso ya que las muestras a las que se les va hacer la prueba son de una sub-rasante, y determinar la gravedad específica del material.

### Procedimiento

1. Pesar la cantidad de material requerida, se recomienda material secado al aire, pero si es sacado al horno debe darse un tiempo de curado del material. Se mezcla con la cantidad de agua determinada para alcanzar un porcentaje de humedad, estos datos se sacan de la prueba de proctor.
2. Determine el contenido de agua promedio usando un mínimo de dos muestras, una cuando se conformo la muestra y la otra cuando se finaliza el ensayo.



2.1. Pesar el molde sin collarín y sin disco espaciador.

3. El equipo que se va utilizar para la preparación de la muestra, es el que se describe en las normas AASHTO T193-99 o ASTM D1883-07. Determine el diámetro interno y la altura del molde con una precisión de  $\pm 0.02$  mm y calcule el volumen del molde.

3.1. El apisonador se utiliza sin el camisa de hierro. (Ver figura 7M)

3.2. Conseguir una varilla para graduar alturas, un mazo de hule, una regla de metal.

3.3. La altura del molde se va determinar a lo interno considerando el espaciador que se coloca para la prueba de CBR.

4. Seleccione el número de capas a ser usadas para la preparación de la muestra. Se va a determinar de forma arbitraria, pero, típicamente, aumenta el número de capas cuando se requiere incrementar el peso unitario seco. Se recomienda utilizar un espesor de 12mm por capa.

5. Determine el peso total húmedo para el material requerido para la preparación de la muestra, como sigue:

$$W_T = \gamma_{dr}(1 + w_a)V_m$$

Ecuación 5M.

Donde:

$W_T$ , peso total húmedo.

$\gamma_{dr}$ , peso unitario seco requerido para la muestra de la prueba.

$w_a$ , contenido de agua promedio del material preparado.

$V_m$ , volumen final del material compactado o volumen del molde.

6. Determine el peso húmedo del material requerido para cada capa, de la siguiente forma:

$$W_L = W_T/n_t$$

Ecuación 6M

Donde:

$W_T$ , peso del material requerido para cada capa.

$n_t$ , número total de capas.

7. Para la primera capa a ser compactada, se selecciona un valor de sub-compactación inicial. Ladd recomienda un valor de 0 para muestras densas, para el caso de la sub-rasante a analizar se determina una sub-compactación del 20% menos del valor al que se quiera alcanzar. Cada capa anterior recibe un porcentaje menor de sub-compactación conforme a la relación mostrada en la figura 6M.

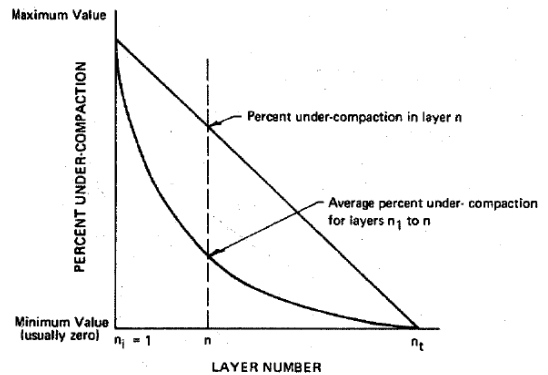


Figura 6M. Concepto de sub-compactación.



Figura 7M. Molde y mazo usados en conformación de las probetas.

La sub-compactación de cada capa se determina de la siguiente forma.

$$U_n = U_{ni} - \left[ \frac{(U_{ni} - U_{nt})}{n_t - 1} * (n - 1) \right]$$

Ecuación 7M.

Donde:

$U_n$ , porcentaje de sub-compactación en la capa que va ser considerada.

$U_{ni}$ , porcentaje de sub-compactación seleccionado para la primera capa.

$U_{nt}$ , porcentaje de sub-compactación seleccionado para la última capa. (Usualmente es cero)

$n_t$ , número total de capas.

$n$ , número de capa a ser considerada.

8. Calcule la altura requerida de la muestra desde la parte superior de la  $n$  capas, según la siguiente ecuación.

$$h_n = \frac{h_t}{n_t} \left[ (n - 1) + \left( 1 + \frac{U_n}{100} \right) \right]$$

Ecuación 8M

Donde:

$h_n$ , altura a ser considerada de la capa en la parte superior del material compactado.

$h_t$ , altura final de la muestra (altura final).

$n_t$ , número total de capas.

$n$ , número de la capa a ser considerada.

$U_n$ , porcentaje de sub-compactación a ser compactada.

8.1. Para medir esas alturas en el molde, se va a utilizar una varilla, la cual estará graduada con las alturas resultantes de la ecuación anterior. Se le adhiere una cinta a la varilla y se van marcar los espesores de cada capa, de tal forma que cuando se coloque la siguiente, la marca suba con respecto a su referencia, para esto se utiliza la regla. Ver figura siguiente.



Figura 8M. Medir capas por medio de la calibración de una varilla.

9. Se pesa la cantidad de material requerido para la capa, como se determinó en el paso seis, y se coloca dentro de recipientes cerrados.

10. Coloque un papel de filtro dentro del molde, encima del espaciador, con el fin de cuando se de vuelta la probeta el material no quede pegado a la base. Coloque el material para la primera capa, debe asegurarse la distribución del material dentro del molde. Con la placa de bronce puede darle una pequeña presión, al golpear el pistón con el mazo de hule, para nivelar.

10.1. Usando la barra de apisonamiento, compacte la superficie del material iniciando con un patrón circular en la periferia del molde y trabajando hacia el centro del molde. Inicialmente, la fuerza de apisonamiento usada debe ser ligera para distribuir y sentar el material uniformemente en el molde. La fuerza debe ser entonces gradualmente incrementada hasta llegar a la uniformidad en la parte superior del molde y si es necesario puede golpear con el mazo de hule el pistón para cumplir con la densidad requerida.

10.2. Seguidamente, escarifique la superficie compactada para que la profundidad sea igual a un decimo del espesor de la capa.

11. Repita el paso nueve (si es requerido) y diez hasta que la última capa este en su lugar. Ver figura 9M.



Figura 9M. Se coloca el material, se compacta y escarifica, se repite el proceso.

12. Cuando se realiza la última capa, se quita el collarín y se verifica la altura. Con cuidado se le quita el disco espaciador y se pesa el molde con el material. Luego se falla la probeta para CBR y se reportan los resultados.

Este método tiene algunas dificultades las cuales son, la energía que se debe compactar el material, para el caso de sub-rasante y muestras poco densas, se utiliza la barra de apisonar para CBR y se deja caer a 5cm o menos depende como se compacte el material, luego se verifica el espesor de la capa, si no cumple se vuelve apisonar hasta que cumpla. También determinar el número de capas, y el grado de sub-compactación de la capa inicial son elementos de estimación arbitraria, los cuales con la experiencia puede darse valores satisfactorios.

## Cálculos

Previo a la prueba se tuvo que haber hecho la prueba de proctor, y determinar la gravedad específica. Antes de hacer las pruebas también se tienen que medir los moldes que se usarán, para llevar las cantidades de material, alturas de las capas y la cantidad de agua que se le va a añadir a las muestras.

Con la densidad y la humedad relacionada a esta, para el 95% del proctor óptimo, se calcula la relación de vacíos y la saturación como sigue:

$$e = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_{dr}}{\gamma_{dr}}$$

Ecuación 9M

Donde:

$e$ , relación de vacíos.  
 $G_s$ , gravedad específica.  
 $\gamma_w$ , peso específico del agua.  
 $\gamma_{dr}$ , peso específico seco.

$$S = \frac{G_s w}{e}$$

Ecuación 10M

Donde:

$S$ , saturación.  
 $w$ , humedad del material.

Para las demás muestras, como lo que se quiere es que varíe la saturación se calculan los demás puntos de tal forma que la relación de vacíos quede constante, es decir el peso específico seco es constante, al igual que la gravedad específica del material, como se observa en la ecuación 10M.

Se varía el valor de la saturación y se obtiene un valor de humedad, con ese nuevo valor se introduce a la ecuación 5M y se obtiene el peso húmedo asociado a una saturación. Se calcula la cantidad de agua para una muestra y se realiza el procedimiento descrito.

## Capacidad de soporte de California (CBR)

### Designación

ASTM D1883-07  
AASHTO T193-99

### Preparación de la muestra

Debe prepararse 5 Kg de suelo para cada uno de los puntos. La muestra se prepara según el método C del ensayo ASTM D698 o la AASHTO T99. El CBR se va a determinar según el contenido de humedad óptimo a diferentes densidades secas, por lo que se realizarán tres probetas a diferentes energías de compactación, es decir los golpes por capa varían en 56, 25 y 10. El cual se va a construir la curva de CBR versus densidad seca, para determinar el CBR asociado al 91% y 95% del óptimo.

### Procedimiento

1. Tomar el peso del molde sin collarín, ni la base.
2. Se debe tomar una muestra de material para determinar el contenido de humedad antes de compactar y después de compactar, del material remanente.
3. Colocar el disco espaciador en la base del molde y cubrirlo con el filtro de papel.
4. Se compacta el suelo en tres capas a la humedad óptima, las tres probetas se compactan a 56, 25, y 10 golpes por capa respectivamente.
5. Quitar el collarín y enrasar la muestra, si quedan vacíos se pueden rellenar con material fino. Ver la siguiente figura.





**Figura 10M.** Probeta conformada al ras del molde.



**Figura 11M.** Sumergimiento de moldes de CBR.

6. Separar la base del molde, colocar el molde con el disco espaciador en una plataforma de manera que la parte del disco quede en la parte inferior del molde, se coloca un papel de filtro donde se encuentra la parte del suelo expuesta, luego se toma la base se invierte y se asegura en el molde. Cuando el molde esté bien asegurado a la base y con cuidado de no perturbar la muestra se voltea y se le quita el disco espaciador.

7. Se pesa el molde con la muestra para luego determinar la densidad antes de sumergir la muestra.

8. Antes de sumergir la muestra se le debe aplicar una sobrecarga igual al peso de las capas superiores, si es que se tiene el dato. Los técnicos del MOPT le aplican una sobrecarga de 3500g tomando en cuenta el plato poroso de mango ajustable, este es el dato que se va usar en los experimentos.

9. Se sumerge totalmente la probeta en una pileta con agua por un tiempo de 96 horas, asegurándose que el nivel del agua este en un mínimo de 25mm de la parte superior del molde. Como se aprecia en la figura 11M.

10. Colocar el deformímetro y tomar una lectura al inicio, cuando la muestra se encuentra sumergida y la otra al final del periodo. Para llevar un control del abultamiento de la muestra también se puede tomar lecturas cada día cuando la muestra está sumergida.

11. Al cabo de las 96 horas del sumergido de las muestras se retiran y se deja que drenen alrededor de 15 min.

12. Pesar el molde con la muestra saturada, para determinar la densidad después de sumergido.

13. Colocar el molde en la máquina en la que se va fallar la muestra, ajustar la carga del pistón a 44KN o un poco más, con el fin de cuando se tome las lecturas sea cuando se está generando algún tipo de resistencia por la muestra y los datos correspondan a la deformación de lectura. Cuando se cumpla condición anterior poner en cero el reloj de deformación. La muestra tiene que tener la misma sobrecarga que cuando fue sumergida.

14. Tomar lecturas de carga cada 0,025 in (0,635mm) de penetración hasta llegar a 0,100 in (2,540mm) después pasar a intervalos de 0,050 in (1,270mm) hasta 0,500 in (12,700mm), con una velocidad de penetración de 1,27 mm/min.

15. Tomar una muestra de humedad.



Figura 12M. Fallo de probeta en máquina de CBR.

## CBR de campo

### Designación

ASTM D4429-04

Según la norma ASTM esta prueba sirva para evaluar las condiciones de la sub-rasante, sub-base y algunas bases, donde se desee comprobar el valor de CBR. Contempla que si el valor quiere ser usado para diseño se debe tomar en cuenta:

- a. El grado de saturación debe ser de 80% o mayor.
- b. Si el material es de grano grueso y baja cohesión, no se ve afectado significativamente por los cambios en el contenido de humedad.
- c. Verificar que el suelo no ha sido modificado por las actividades de construcción durante los dos años anteriores a la prueba.

### Procedimiento

Tomado de la norma ASTM D4429-04 y traducida por William Bustillos, con algunas observaciones y prácticas utilizadas a la hora de su aplicación.

- 1 Preparar la superficie por ser probada, eliminando de la superficie material suelto y que no es representativa de la tierra para ensayo. Nivelar la superficie.  
Donde se encuentren materiales no plásticos de base, se extrema el cuidado para no perturbar la superficie de ensayo.

El espaciamiento de los ensayos de penetración será tal que las operaciones en un punto no deben perturbar el suelo para el siguiente punto por ser penetrado. Este espaciamiento puede variar desde un mínimo de 17,5 cm en suelos plásticos a 38,0 cm en suelos granulares gruesos.

- 2 Localizar el camión para que el centro de la presión colocada sea directamente sobre la superficie de la prueba. Instale la gata del tornillo mecánico con la conexión giratoria en la parte inferior del sistema de unión de la reacción. Coloque las gatas debajo del camión y levántelo de manera que poco o ningún peso recaiga en la parte trasera, asegúrese que el camión esté nivelado por la parte de atrás.

- 3 Posicione correctamente la gata de tornillo mecánico para la prueba, y conecte el anillo de prueba al final de la gata. A continuación, conecte el adaptador de pistón a la parte inferior del anillo de prueba, conecte el número necesario de las extensiones para estar dentro 12,5 cm de la superficie de la prueba, y conecte el pistón de penetración. Asegure la gata en el lugar. Revise el nivel de la base sobre la gata, para asegurarse que el ensamblado este vertical y ajuste si es necesario.

- 4 Coloque las 4,5 Kg del plato de sobrecarga debajo del pistón de penetración, para que cuando el pistón este descendiendo pase a través del centro del agujero.

- 5 Siente el pistón de penetración bajo una carga de aproximadamente 3 psi (21 kPa). Para un rápido ajuste, use la relación de velocidad alta de la gata. Para materiales de base con una superficie irregular, en la práctica se ajuste el pistón sobre una capa delgada de arena.

- 6 Si es necesario, a fin de lograr una superficie lisa e incrementar la sobrecarga del plato mientras esta sobre el pistón, se puede esparcir uniformemente arena limpia y fina a una profundidad de 3 a 6 mm sobre la superficie por ser cubierta por la placa. Esto sirve para distribuir el peso de la sobrecarga de manera uniforme.

- 7 Adicione pesos de sobrecarga en el plato de sobrecarga para que la unidad de carga sea equivalente a la intensidad de carga del material o pavimento los cuales recubrirían la sub-rasante o base o ambos, excepto que el peso mínimo aplicado deba ser de 10-lb (4,5-Kg) en el plato de sobrecarga más de unas 20-lb (9-Kg) de peso de sobrecarga.

8 Fijar el reloj de las deformaciones en las extensiones del pistón y colocarlo en la viga de referencia.

9 Ajuste los relojes en cero, tanto del anillo como el de deformación.

10 Aplique carga al pistón a una razón de penetración aproximadamente de 1,3mm/min. Use una relación de velocidad baja de la gata durante la prueba, para poder mantener una razón de penetración uniforme por el operador. Apunte la deflexión del anillo de prueba a cada 0,025-in (0,64-mm) de incremento en la

penetración, hasta una profundidad de 0,500-in (12,70-mm). En suelos homogéneos, la profundidad de penetración mayor que 0,300-in (7,62-mm) frecuentemente puede ser omitida. Calcule el esfuerzo para cada incremento de penetración en porcentaje.

11 En la finalización de la prueba obtener una muestra en el punto de penetración y determinar el contenido de humedad. La determinación de la densidad también debe ser hecha entre 10,0 a 15,0 cm del punto de penetración.



Figura 13M. Proceso de la prueba de CBR, a) Escavar, nivelar la sub-rasante, b) Colocar el camión y ponerle las gatas, c) Colocar el equipo de CBR y los relojes en cero y d) Fallar la estructura y tomar las lecturas.

## Densidad en sitio, método del cono de arena

### Designación

AASHTO T191-02  
ASTM D1556-64

Los procedimientos se realizaron conforme a las normas estándar.

## Cálculo

El volumen de agujero se determina de la siguiente forma:

$$V = \frac{(m_1 - m_2 - C_c)}{D_a}$$

Ecuación 11M

Donde:

$V$ , volumen del agujero.

$m_1$ , peso inicial del embase con la arena.

$m_2$ , peso final del embase después de realizada la prueba.

$C_c$ , corrección de cono.

$D_a$ , densidad de la arena.

La densidad de la arena se calcula como sigue:



$$D_a = \frac{(m_1 - m_2 - C_c)}{V_c}$$

Ecuación 12M

Donde:

$V_c$ , volumen de un recipiente conocido.

Para determinar la densidad del sitio se debe estimar el peso seco del material y este dividirlo por el volumen del agujero, de la siguiente manera:

$$M_{seca} = \frac{M_{humedad}}{(1 + (w/100))}$$

Donde:

$M_{seca}$ , muestra seca del sitio.

$M_{humedad}$ , muestra humedad del sitio.

$w$ , humedad de la muestra.

$$D_s = \frac{M_{seca}}{V}$$

Ecuación 14M

Donde:

$D_s$ , densidad seca de la muestra del sitio.



**Figura 14M.** Proceso de la prueba de densidad en sitio, a) Se limpia y nivela el lugar donde se va hacer la prueba, b) Se excava dentro del plato a una profundidad no mayor a 15cm y c) Se vierte la arena Ottawa en el agujero hecho.

# Resultados

## Límites de Atterberg

Se determinó el límite líquido, plástico y el índice de plasticidad por medio de las designaciones

AASHTO T89-60 y T90-56. Para las estaciones en estudio, como se muestran en el cuadro 1R.

<b>CUADRO 1R. LÍMITES DE ATTERBERG, PARA CADA MUESTREO</b>				
Límites de Atterberg	Estaciones			
	3+900	2+700	1+900	1+000
Límite líquido	56	51	63	58
Límite plástico	25	32	55	42
Índice de plasticidad	31	19	8	16

## Granulometría

Los suelos analizados por medio de la AASHTO T11-00 y la ASTM D421-58, fueron suelos finos

pasando la malla cuatro. No se pudo hacer el análisis por hidrómetro ya que el laboratorio del MOPT no contaba con los reactivos necesarios para hacer la prueba.

<b>CUADRO 2R. PORCENTAJE PASANDO LA MALLA 200, PARA CADA ESTACIÓN.</b>			
Estaciones			
3+900	2+700	1+900	1+000
78.5	90.4	95.5	93.8

## Clasificación del suelo

Se determinó según la metodología para la clasificación de la AASHTO, la cual es la más

usada, para determinar los suelos usados en carreteras, también se clasificó por medio de la SUCS. Se aprecia las clasificaciones según por estaciones en el siguiente cuadro.

CUADRO 3R. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN AASHTO Y SUCS				
Sistema	Estación			
	3+900	2+700	1+900	1+000
AASHTO	A-7-6 (19)	A-7-5 (13)	A-5 (12)	A-7-5 (14)
SUCS	CH	MH	MH	MH

## Prueba de Proctor estándar

humedad óptima, por medio de la prueba Proctor estándar, según las normas AASHTO T99-01 y la ASTM D698-00, en molde pequeño. Lo que se generaron las siguientes graficas. (Figuras 1R, 2R, 3R y 4R).

Para cada estación de análisis de la carretera se determinó la densidad seca máxima y la

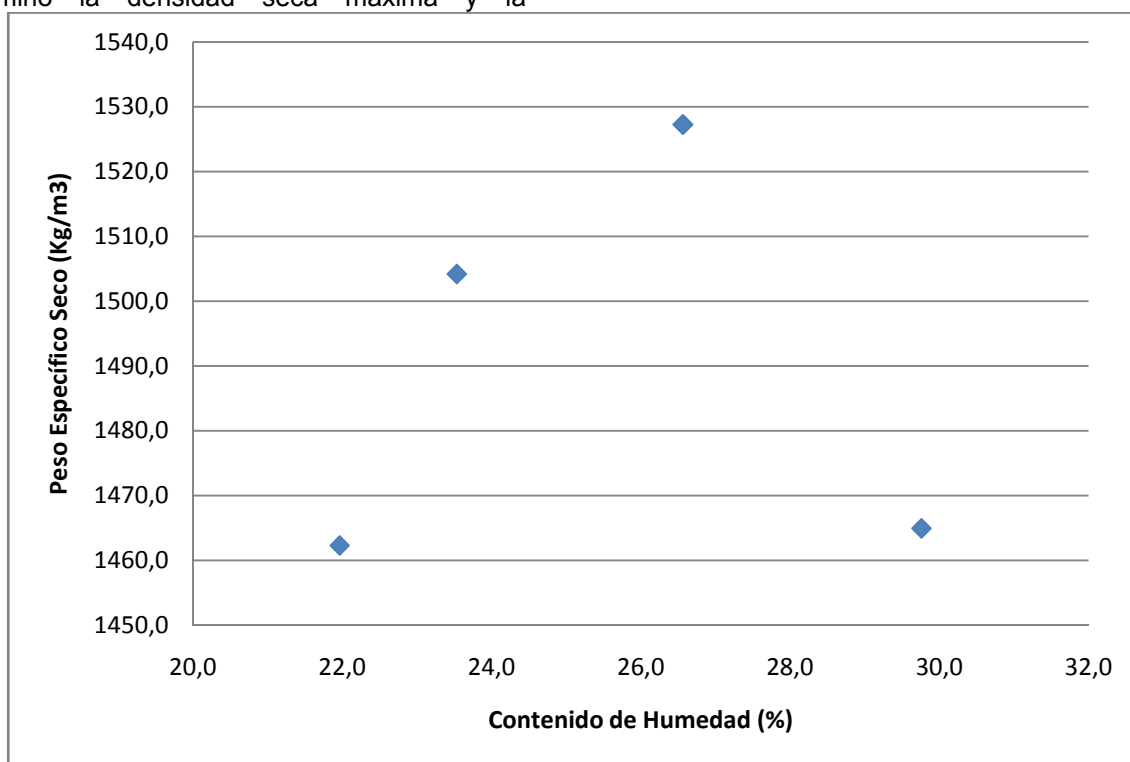


Figura 1R. Porcentaje de contenido de humedad versus peso específico seco y curva de mejor ajuste, para la estación 3+900.

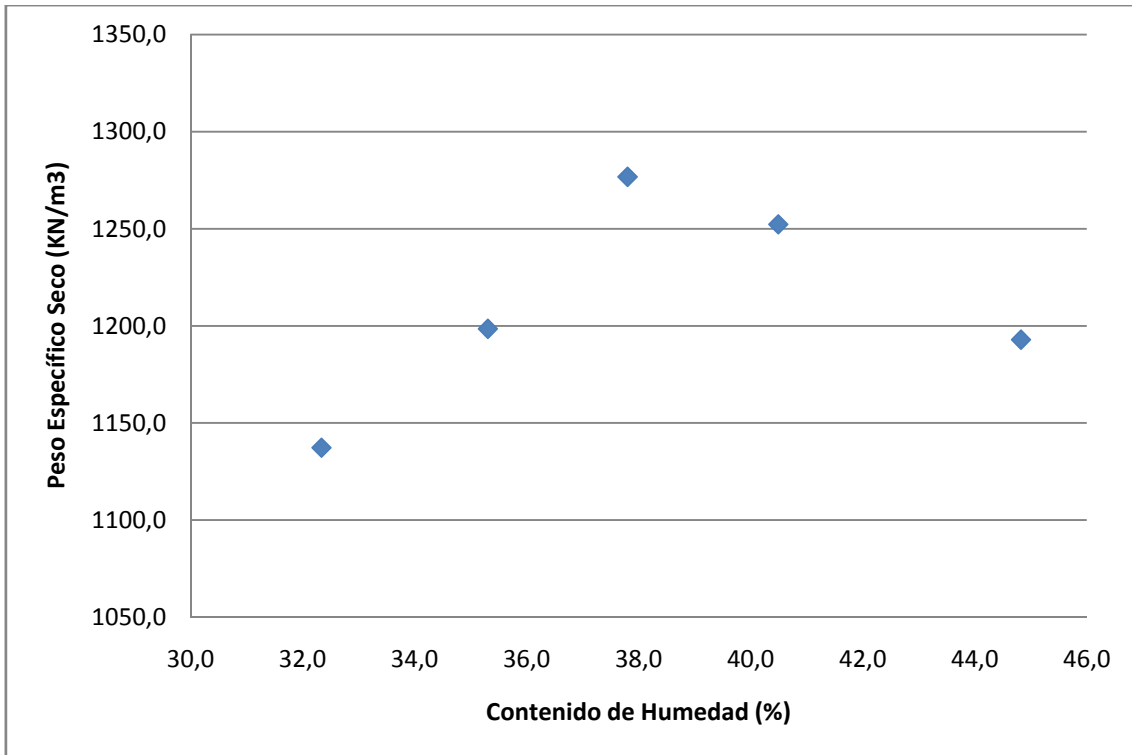


Figura 2R. Porcentaje de contenido de humedad versus peso específico seco y curva de mejor ajuste, para la estación 2+700.

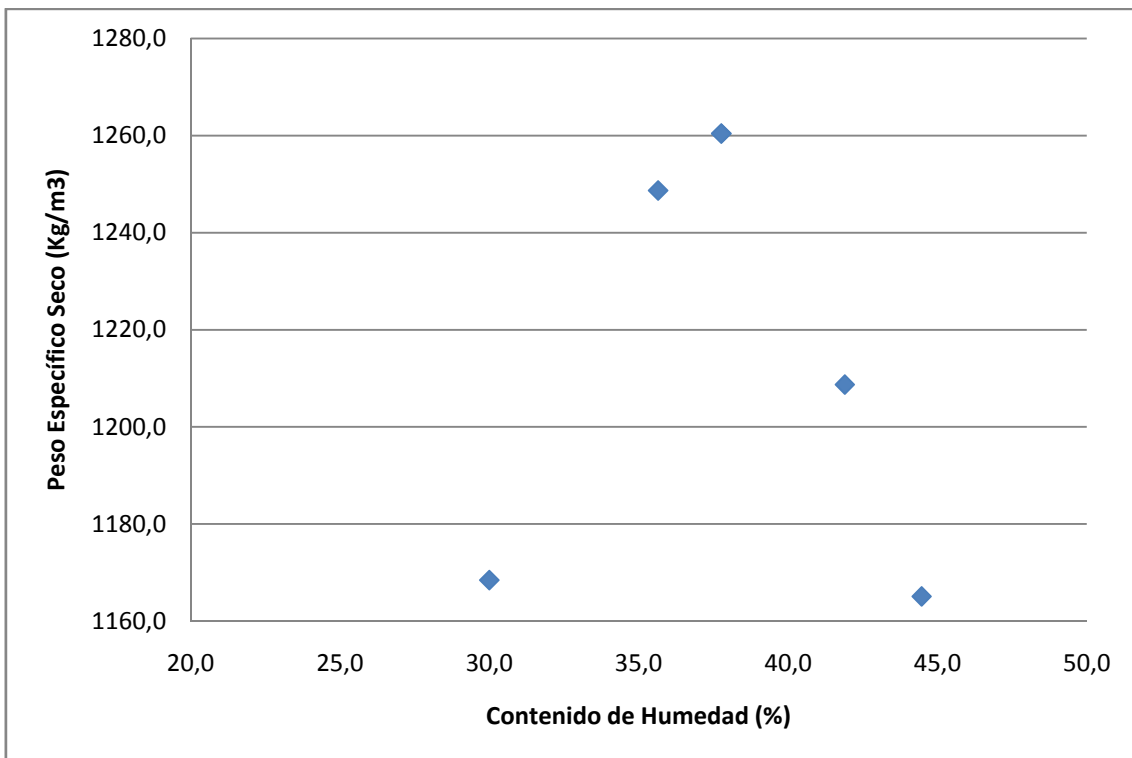


Figura 3R. Porcentaje de contenido de humedad versus peso específico seco y curva de mejor ajuste, para la estación 1+900.

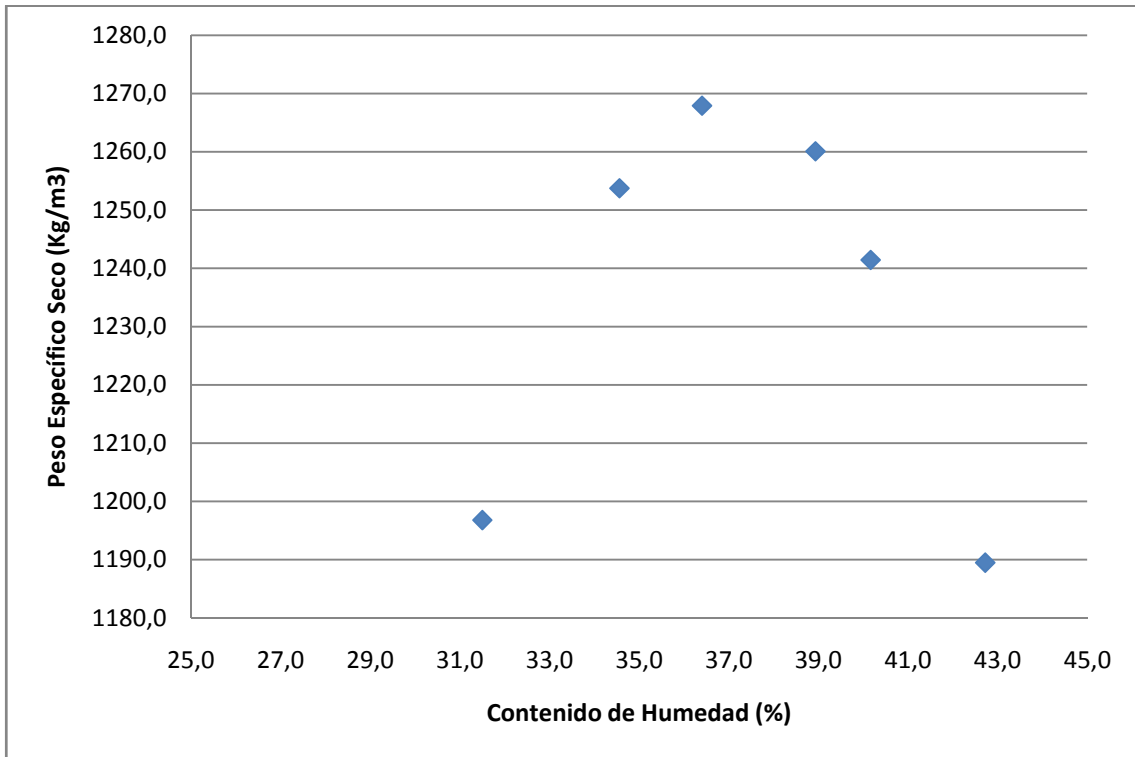


Figura 4R. Porcentaje de contenido de humedad versus peso específico seco y curva de mejor ajuste, para la estación 1+000.

<b>CUADRO 4R. RESUMEN DEL PUNTO ÓPTIMO DE LA PRUEBA DE PROCTOR ESTÁNDAR.</b>				
	Estaciones			
Punto Óptimo	3+900	2+700	1+900	1+000
% de Humedad	25,9	39,5	37,1	37,0
Peso seco ( $\gamma$ , Kg/cm <sup>3</sup> )	1528,9	1262,7	1256,8	1268,0



# Relación de soporte de California (CBR) en laboratorio

con el mazo, y la curva la cual relaciona la densidad que se alcanza por la cantidad de golpes con el porcentaje de CBR.

Se procede a calcular el CBR de acuerdo con las normas AASHTO T193-99 y ASTM D1883-07, para cada estación en análisis. Se mostrarán las curvas generadas para tres cantidades de golpes

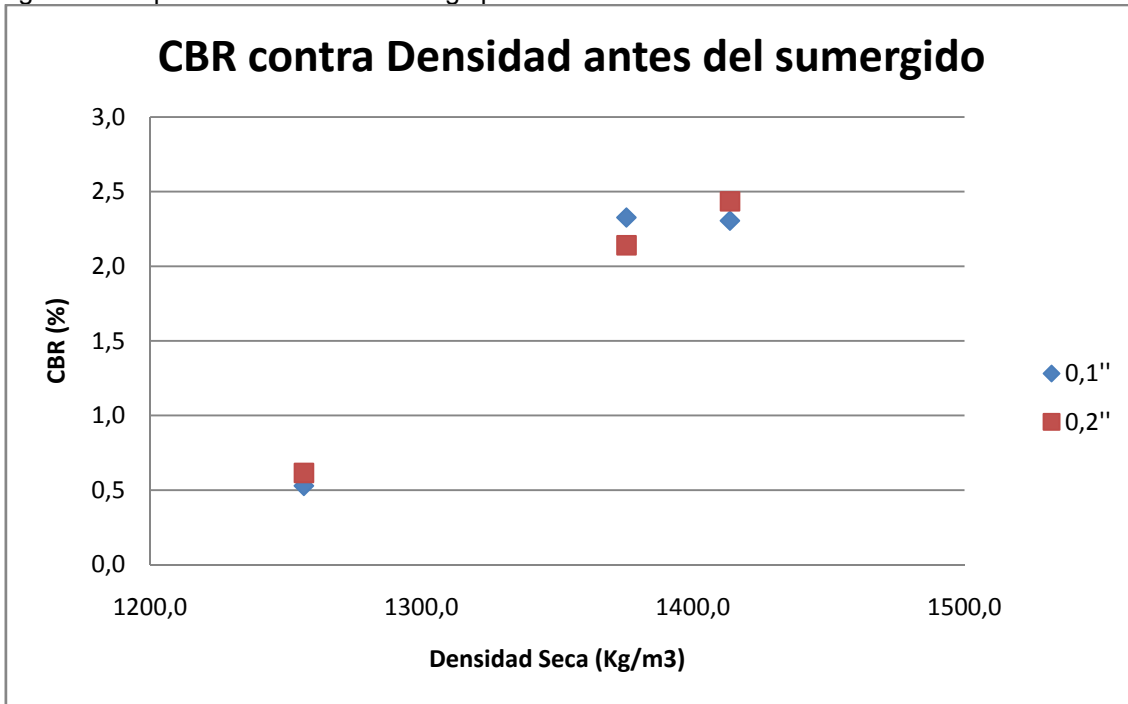


Figura 5R. Densidad versus porcentaje de CBR antes de sumergir las probetas en la pileta, para la estación 3+900, en 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración.

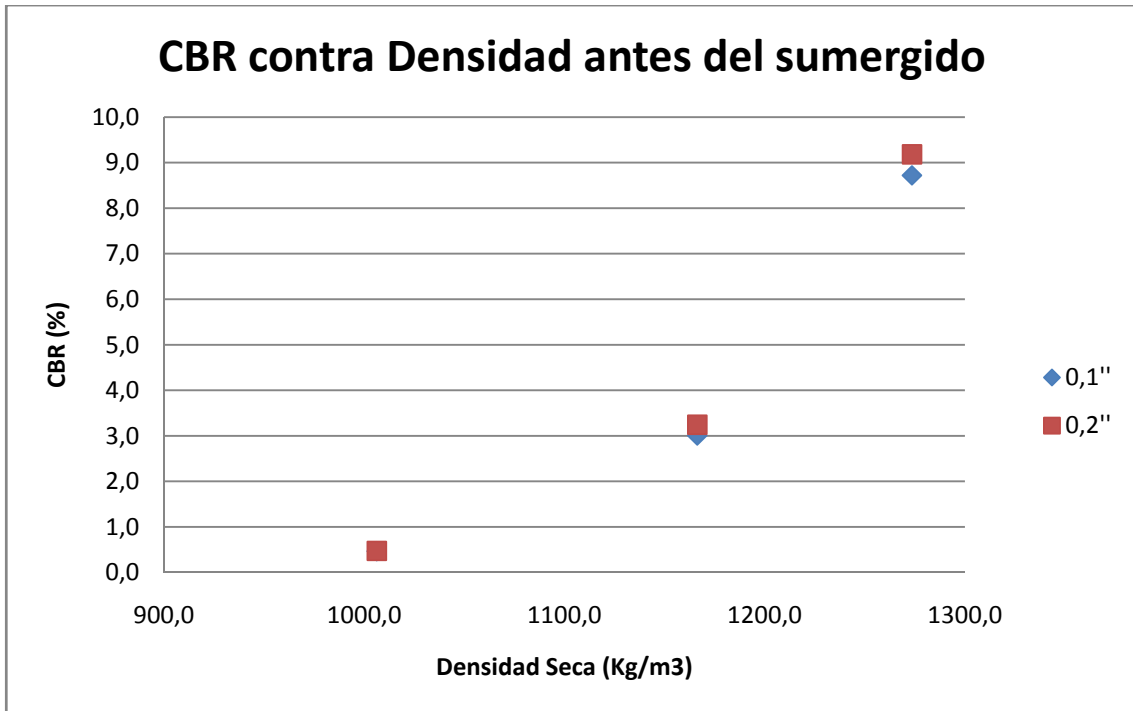


Figura 6R. Densidad versus porcentaje de CBR antes de sumergir las probetas en la pileta, para la estación 2+700, en 0,1'' y 0,2'' pulgadas de penetración.

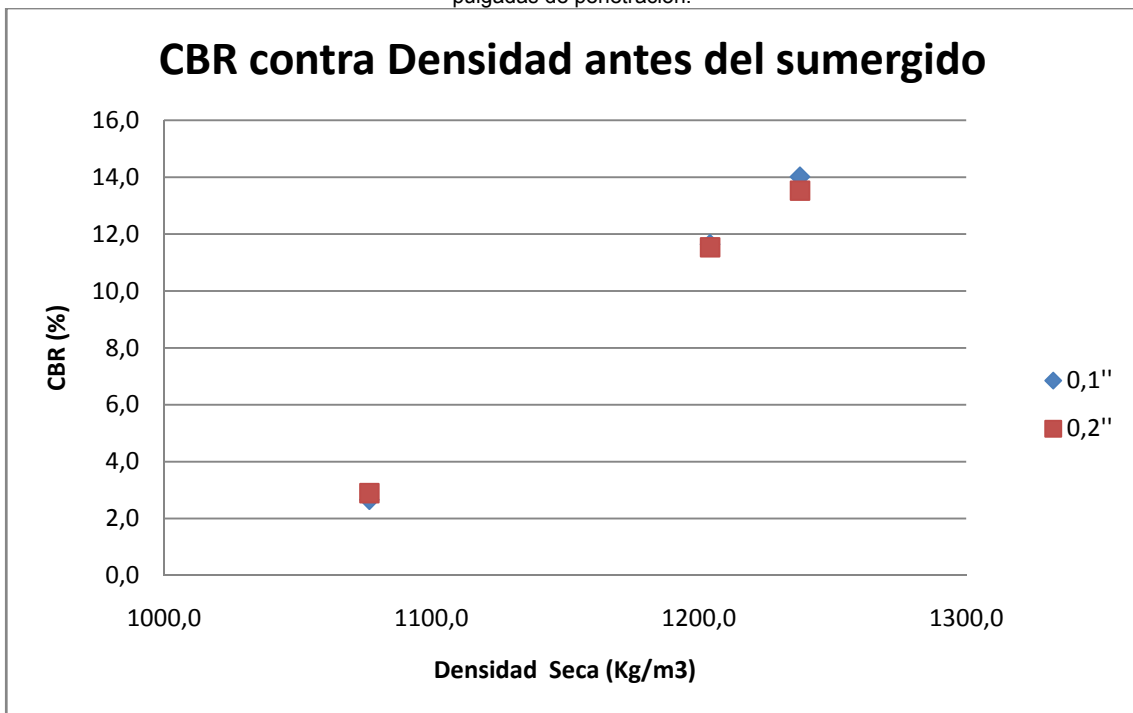


Figura 7R. Densidad versus porcentaje de CBR antes de sumergir las probetas en la pileta, para la estación 1+900, en 0,1'' y 0,2'' pulgadas de penetración.

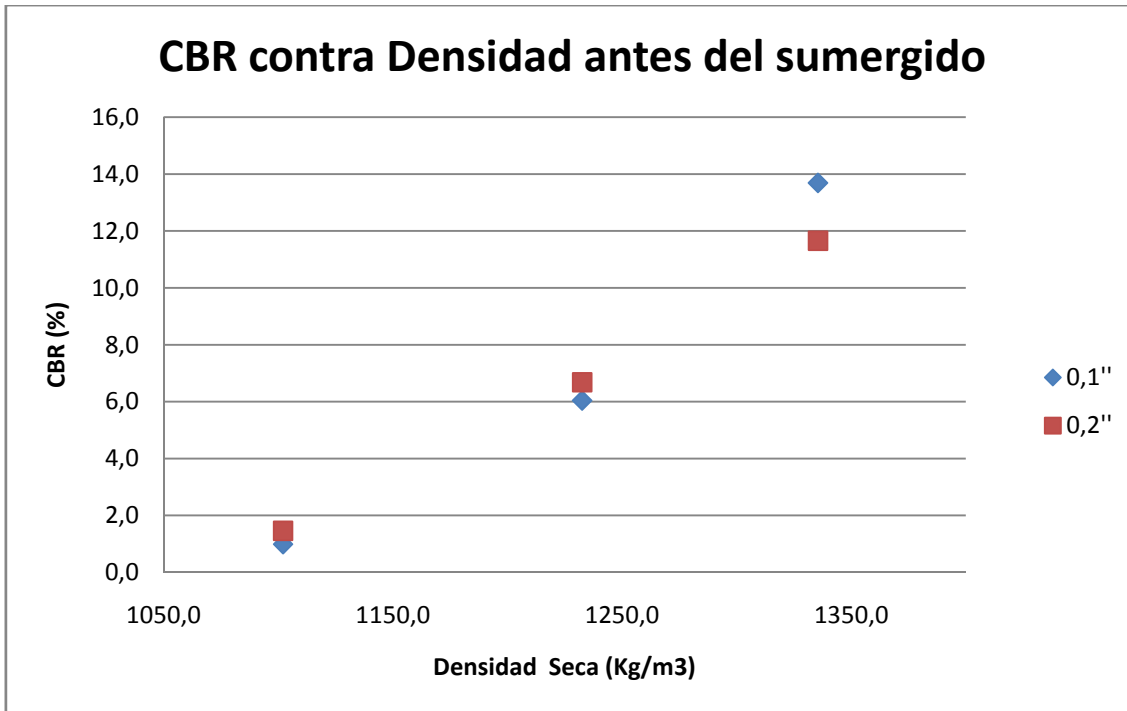


Figura 8R. Densidad versus porcentaje de CBR antes de sumergir las probetas en la pileta, para la estación 1+000, en 0,1'' y 0,2'' pulgadas de penetración.

**CUADRO 5R. VALORES DE CBR PARA 0,1 Y 0,2 PULGADAS DE PENETRACIÓN.**

Golpes	Estaciones					
	3+900			2+700		
	Densidad (Kg/m3)	0,1'	0,2'	Densidad (Kg/m3)	0,1'	0,2'
56	1413,6	2,31	2,44	1273,6	8,72	9,18
25	1375,5	2,33	2,14	1166,3	3,01	3,24
10	1256,6	0,53	0,62	1006,3	0,47	0,47

Golpes	Estaciones					
	1+900			1+000		
	Densidad (Kg/m3)	0,1'	0,2'	Densidad (Kg/m3)	0,1'	0,2'
56	1237,8	14,02	13,53	1335,5	13,69	11,66
25	1204,2	11,64	11,54	1232,6	6,04	6,68
10	1076,8	2,66	2,90	1102,1	0,99	1,46

## Gravedad específica

siguiente cuadro muestra el valor obtenido para cada estación.

Se realizó la prueba según las normas AASHTO y ASTM, para suelos finos (pasan la malla 4). El

<b>CUADRO 6R. GRAVEDAD ESPECÍFICA DETERMINADA CON LA AASHTO T100-03 Y LA ASTM D854-00, PARA CADA ESTACIÓN.</b>				
Descripción	Estaciones			
	3+900	2+700	1+900	1+000
Peso picnómetro + muestra + agua (25°C) (g)	728,77	739,77	738,25	742,91
Peso seco (g)	83,1	98,83	96,3	104,5
Peso del picnómetro con agua (g)	678,21	678,96	678,16	678,16
Peso del picnómetro (g)	179,97	180,94	179,97	179,97
Peso de agua corriente a 25°C (g)	498,24	498,02	498,19	498,19
Densidad del agua corriente a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,99648	0,99604	0,99638	0,99638
Gravedad específica a 25°C	2,55	2,60	2,66	2,63
Factor de corrección de temperatura ( $\alpha$ )	0,99940	0,99896	0,99930	0,99930
Gravedad específica a 20°C	2,55	2,60	2,66	2,63

## Valor de CBR a diferentes saturaciones

### Conformación de probetas por Sub-Compactación en la estación 3+900 (IM-SBE-10-093)

Para poder conformar probetas, de fallo en CBR, a diferentes saturaciones, se procedió a

realizarlas por medio de la sub-compactación de capas, método sugerido por R. S. Ladd (1978), adaptada para cilindros de CBR.

Los siguientes cuadros muestran la cantidad de capas utilizadas y el porcentaje de sub-compactación que se utilizó en las pruebas. También muestra el cilindro que se usó y cual prueba le corresponde según a la saturación que se deseó llegar.

Las densidades que se desean conformar corresponden al 95% del proctor estándar y la densidad encontrada en campo.

**CUADRO 7R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 3+900, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 0,76 Y UNA DENSIDAD DEL 95% DEL PROCTOR.**

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		
Molde 11		Molde 21		Molde 23		Molde 34		
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	
15,221	11,672	15,224	11,658	15,227	11,662	15,197	11,667	
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>
1	20,000	1,751	20,000	1,749	20,000	1,749	20,000	1,750
2	17,143	3,168	17,143	3,164	17,143	3,165	17,143	3,167
3	14,286	4,585	14,286	4,580	14,286	4,582	14,286	4,584
4	11,429	6,003	11,429	5,996	11,429	5,998	11,429	6,000
5	8,571	7,420	8,571	7,411	8,571	7,414	8,571	7,417
6	5,714	8,837	5,714	8,827	5,714	8,830	5,714	8,834
7	2,857	10,255	2,857	10,242	2,857	10,246	2,857	10,251
8	0,000	11,672	0,000	11,658	0,000	11,662	0,000	11,667

**CUADRO 8R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 3+900, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 0,52 Y UNA DENSIDAD DEL 110% DEL PROCTOR.**

	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Molde 8		Molde 31		Molde 1		Molde 36	
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15,213	11,676	15,189	11,705	15,207	11,767	11,748	11,667
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>
1	20,000	1,274	20,000	1,277	20,000	1,284	20,000	1,282
2	18,000	2,314	18,000	2,320	18,000	2,332	18,000	2,328
3	16,000	3,354	16,000	3,363	16,000	3,380	16,000	3,375
4	14,000	4,394	14,000	4,405	14,000	4,429	14,000	4,422
5	12,000	5,435	12,000	5,448	12,000	5,477	12,000	5,468
6	10,000	6,475	10,000	6,491	10,000	6,526	10,000	6,515
7	8,000	7,515	8,000	7,534	8,000	7,574	8,000	7,561
8	6,000	8,555	6,000	8,577	6,000	8,622	6,000	8,608
9	4,000	9,596	4,000	9,620	4,000	9,671	4,000	9,655
10	2,000	10,636	2,000	10,662	2,000	10,719	2,000	10,701
11	0,000	11,676	0,000	11,705	0,000	11,767	0,000	11,748

Al conformar las probetas, se alcanzó diferentes características variando la humedad de cada una

de ellas, lo que se logro diferentes saturaciones a una misma relación de vacios.

**CUADRO 9R. CARACTERÍSTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 0,76. ESTACIÓN 3+900**

	Pruebas			
	P1	P2	P3	P4
Y <sub>humedo</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1770,4	1611,6	1685,8	1842,9
Y <sub>seco</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1451,6	1454,8	1454,1	1454,5
Humedad (%)	22,0	10,8	15,9	26,7
e	0,75	0,75	0,75	0,75
Saturación (S)	0,74	0,37	0,54	0,91

**CUADRO 10R. CARACTERISTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 0,52. ESTACIÓN 3+900**

	Pruebas			
	P1	P2	P3	P4
$\gamma_{humedo}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2011,8	1989,6	1941,8	1968,1
$\gamma_{seco}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1686,1	1674,6	1681,0	1682,3
Humedad (%)	19,3	18,8	15,5	17,0
e	0,51	0,52	0,51	0,51
Saturación (S)	0,97	0,92	0,77	0,85

**Curva de saturación contra CBR, para la estación 3+900 (IM-SBE-10-093)**

saturaciones, luego se relaciono los valores de CBR a 0,1' y 0,2' contra la saturación asociada. Como se muestra.

Se falló cada cilindro conformado en la máquina de CBR, generando cuatro curvas a diferentes

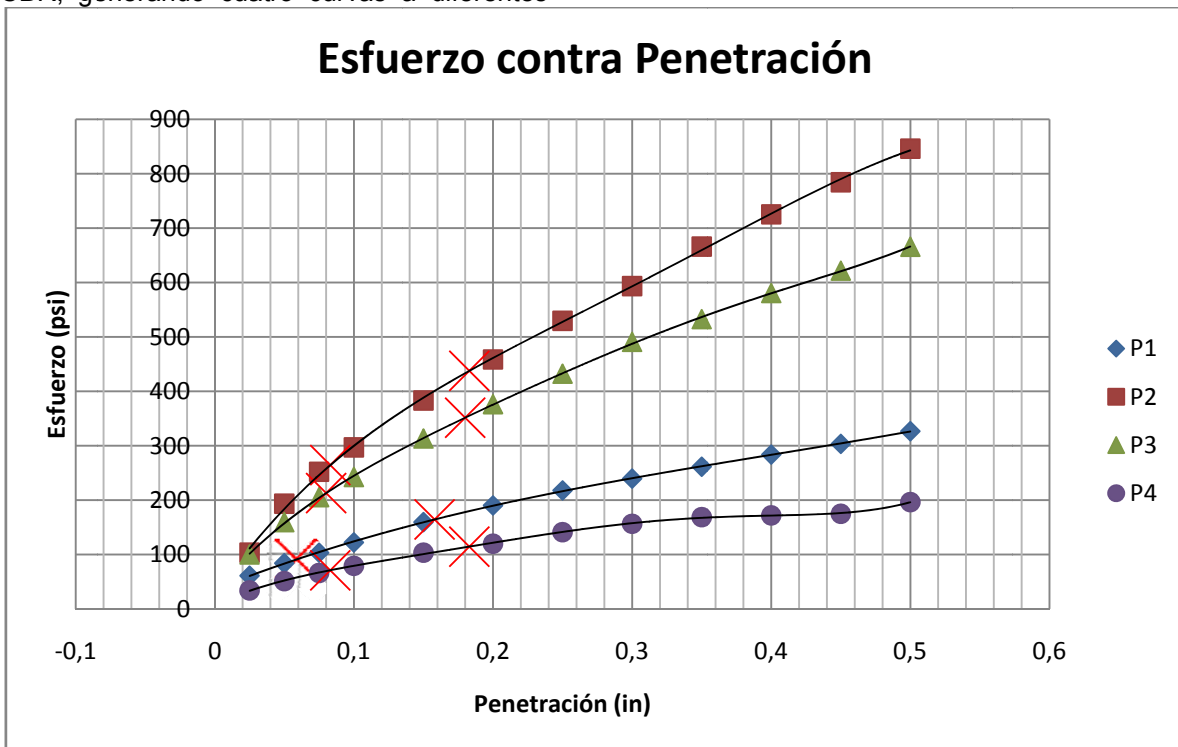
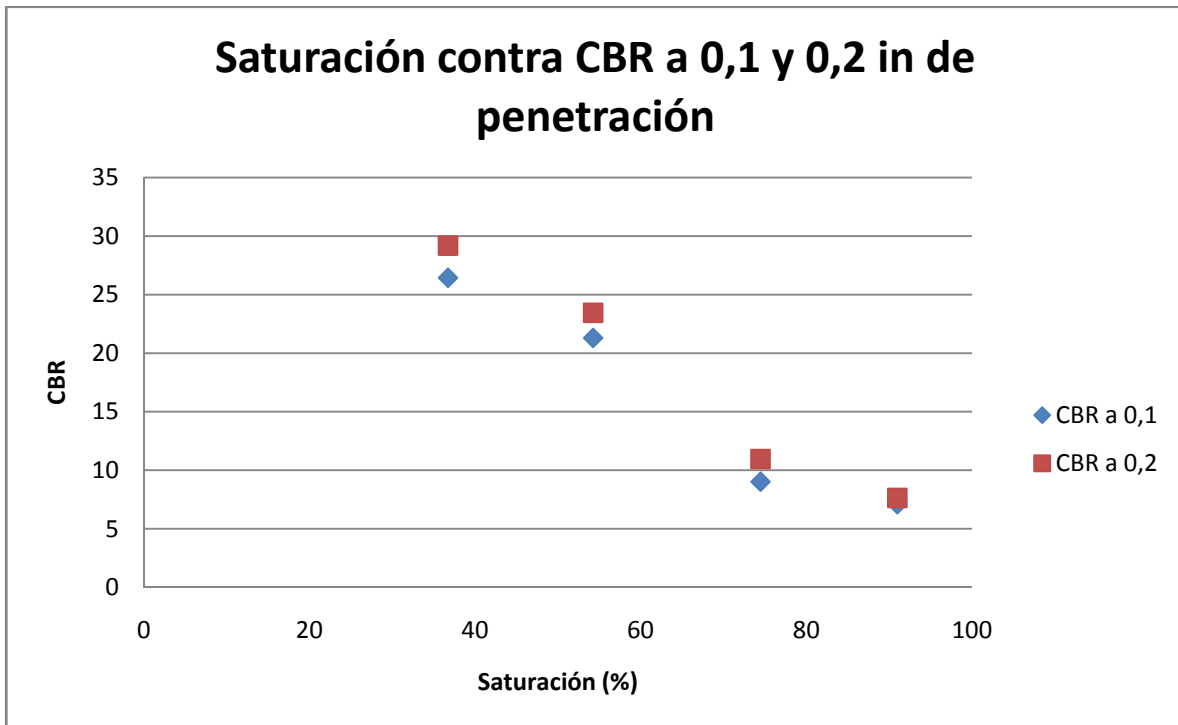


Figura 9R. Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 0,76, falladas en la máquina de CBR. Estación 3+900.

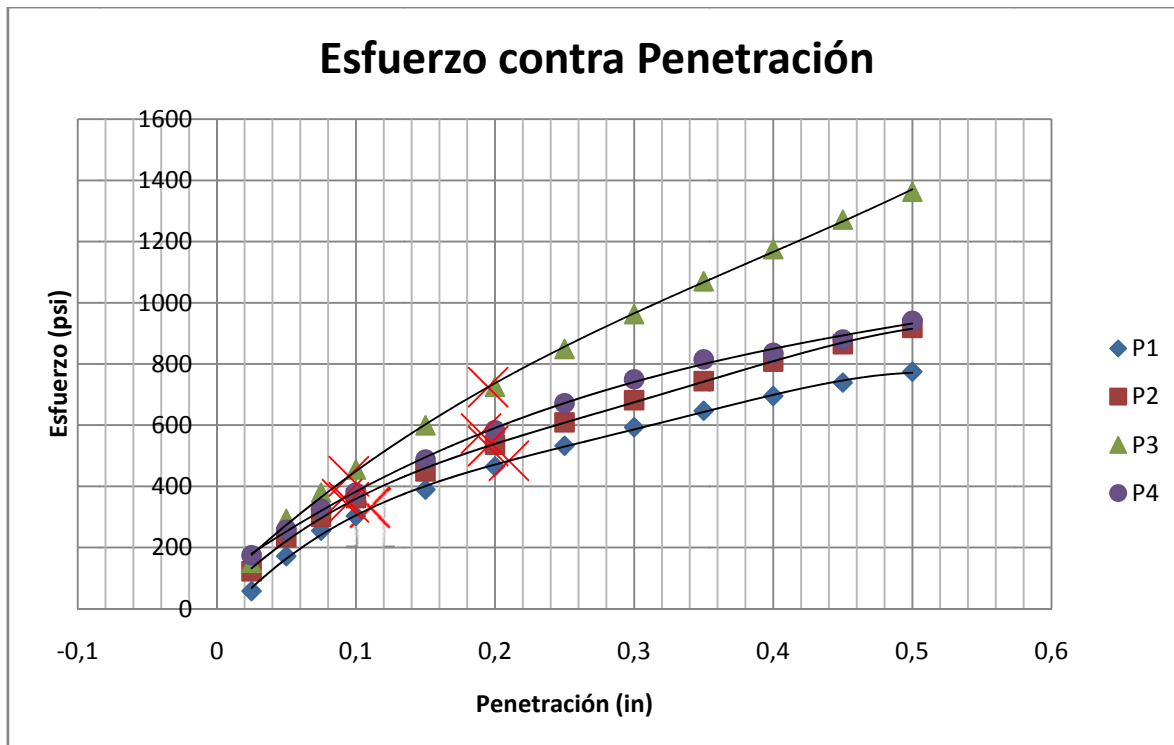
**CUADRO 11R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 0,76, EN LA ESTACIÓN 3+900.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	74,5	9,0	11,0
P2	36,7	26,4	29,2
P3	54,2	21,3	23,4
P4	91,0	7,1	7,6



**Figura 10R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 3+900 a una relación de vacíos de 0,76.

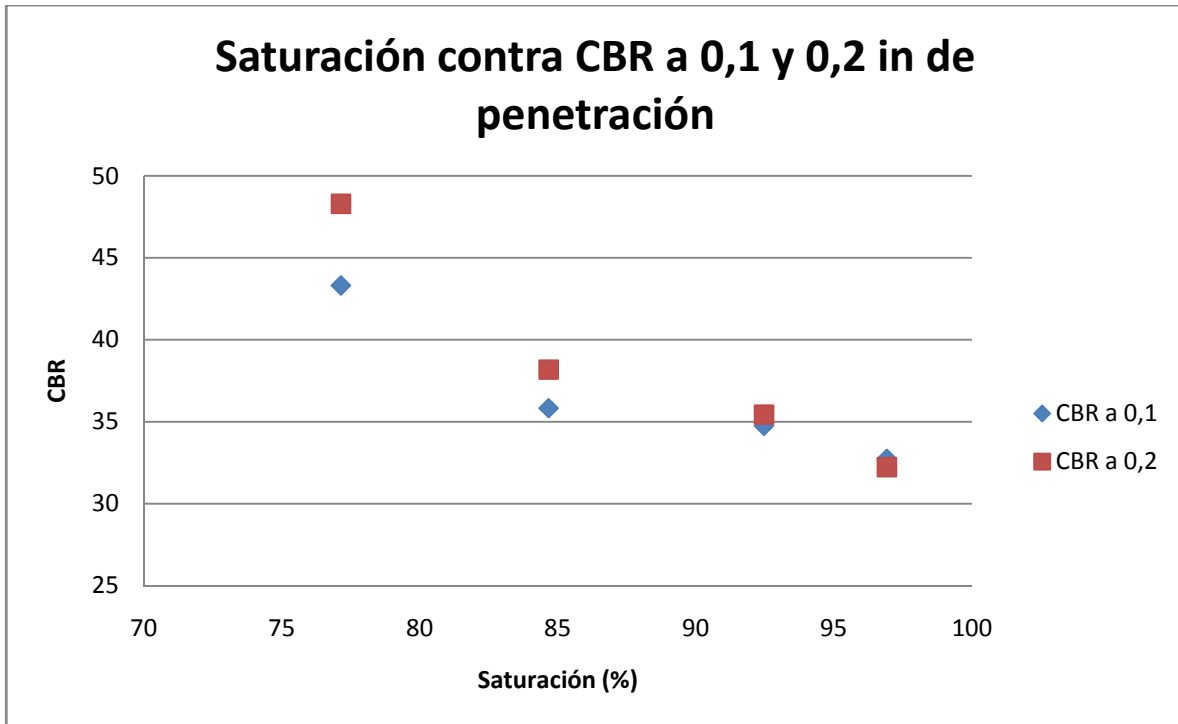




**Figura 11R.** Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 0,52, falladas en la máquina de CBR. Estación 3+900.

**CUADRO 12R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 0,52, EN LA ESTACIÓN 3+900.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	96,9	32,7	32,2
P2	92,5	34,7	35,4
P3	77,1	43,3	48,3
P4	84,7	35,8	38,2



**Figura 12R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 3+900 a una relación de vacíos de 0,52.

## Conformación de probetas por sub-Compactación en la estación 2+700 (IM-SBE-10-094)

Se estima el porcentaje de sub-compactación para cada cilindro, según el molde que se use.

<b>CUADRO 13R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 2+700, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,17 Y UNA DENSIDAD DEL 95% DEL PROCTOR.</b>					
		Punto 1 y 3		Punto 2 y 4	
		Molde 8		Molde 31	
		Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
		15,213	11,676	15,189	11,705
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	
1	20,000	1,751	20,000	1,756	
2	17,143	3,169	17,143	3,177	
3	14,286	4,587	14,286	4,599	
4	11,429	6,005	11,429	6,020	
5	8,571	7,423	8,571	7,441	
6	5,714	8,840	5,714	8,863	
7	2,857	10,258	2,857	10,284	
8	0,000	11,676	0,000	11,705	

**CUADRO 14R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 2+700, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,30 Y UNA DENSIDAD DEL 90% DEL PROCTOR.**

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		
Molde 8		Molde 31		Molde 1		Molde 36		
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	
15,213	11,676	15,189	11,705	15,207	11,767	11,748	11,667	
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>
1	20,000	1,274	20,000	1,277	20,000	1,284	20,000	1,282
2	18,000	2,314	18,000	2,320	18,000	2,332	18,000	2,328
3	16,000	3,354	16,000	3,363	16,000	3,380	16,000	3,375
4	14,000	4,394	14,000	4,405	14,000	4,429	14,000	4,422
5	12,000	5,435	12,000	5,448	12,000	5,477	12,000	5,468
6	10,000	6,475	10,000	6,491	10,000	6,526	10,000	6,515
7	8,000	7,515	8,000	7,534	8,000	7,574	8,000	7,561
8	6,000	8,555	6,000	8,577	6,000	8,622	6,000	8,608
9	4,000	9,596	4,000	9,620	4,000	9,671	4,000	9,655
10	2,000	10,636	2,000	10,662	2,000	10,719	2,000	10,701
11	0,000	11,676	0,000	11,705	0,000	11,767	0,000	11,748

**CUADRO 15R. CARACTERÍSTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,17. ESTACIÓN 2+700**

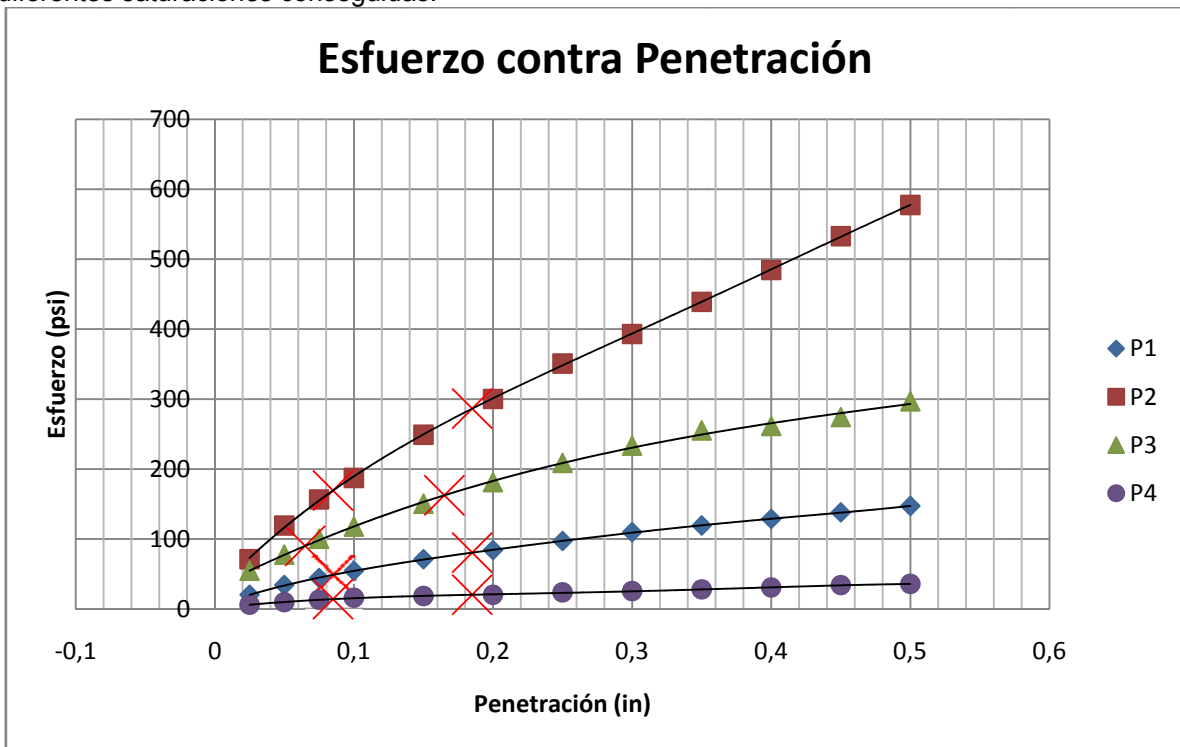
	Pruebas			
	P1	P2	P3	P4
Y <sub>humedo</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1616,1	1442,7	1559,5	1692,6
Y <sub>seco</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1201,7	1204,3	1205,4	1202,9
Humedad (%)	34,5	19,8	29,4	40,7
e	1,16	1,15	1,15	1,16
Saturación (S)	0,77	0,45	0,66	0,91

**CUADRO 16R. CARACTERÍSTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,30. ESTACIÓN 2+700**

	Pruebas			
	P1	P2	P3	P4
$\gamma_{humedo}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1413,5	1499,3	1558,1	1527,6
$\gamma_{seco}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1128,0	1130,8	1133,5	1135,9
Humedad (%)	25,3	32,6	37,5	34,5
e	1,30	1,29	1,29	1,28
Saturación (S)	0,51	0,66	0,76	0,70

**Curva de saturación contra CBR, para la estación 2+700 (IM-SBE-10-094)**

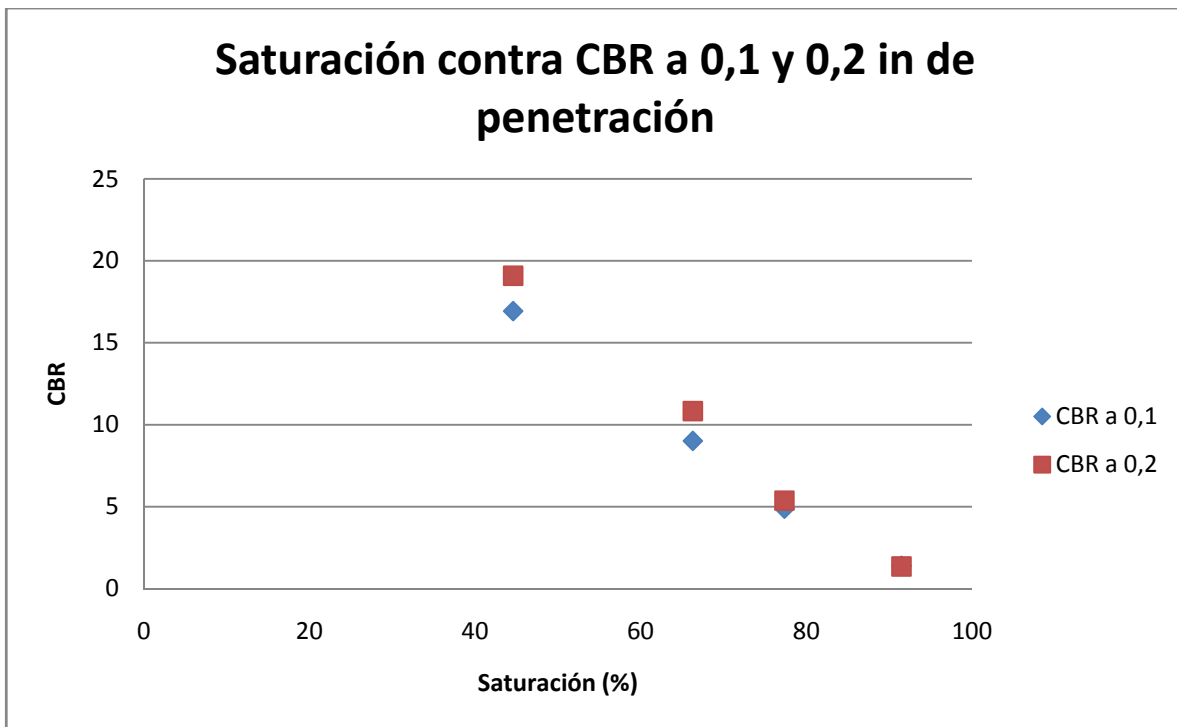
Se fallan los cilindros para determinar los CBR a las diferentes saturaciones conseguidas.



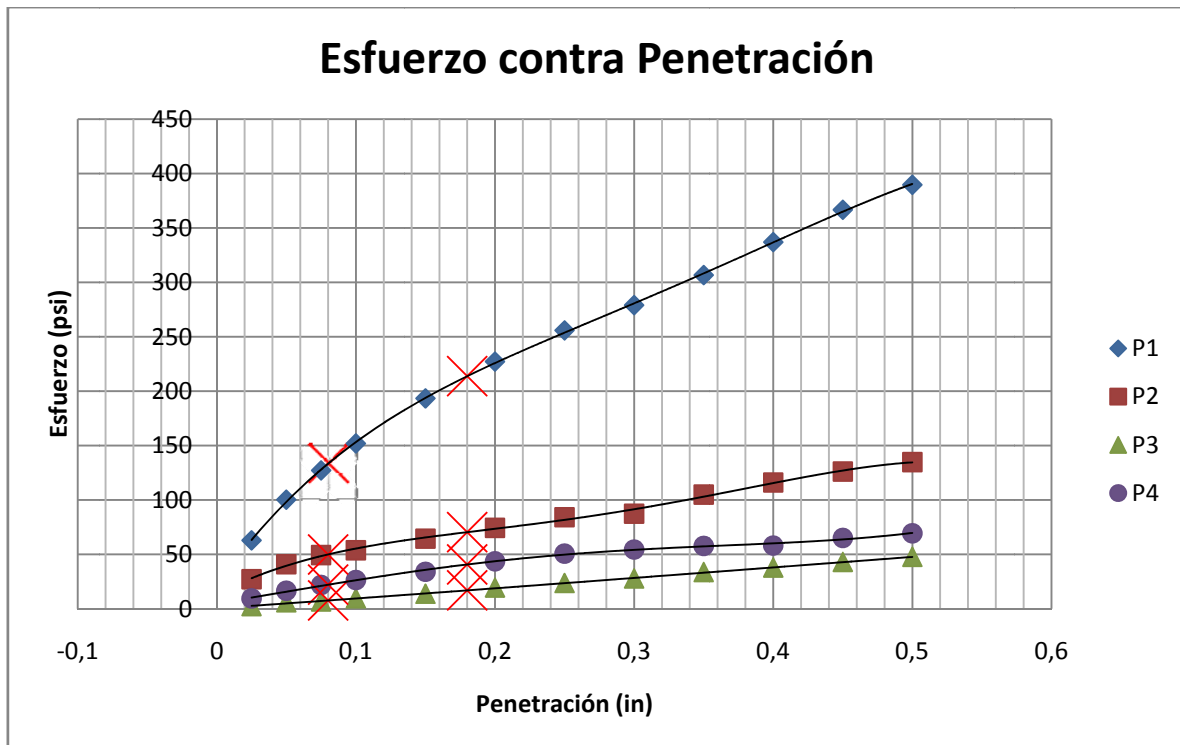
**Figura 13R.** Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,17, falladas en la máquina de CBR. Estación 2+700.

**CUADRO 17R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,17, EN LA ESTACIÓN 2+700.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	77,4	4,88	5,37
P2	44,6	16,93	19,09
P3	66,3	9,02	10,83
P4	91,5	1,40	1,35



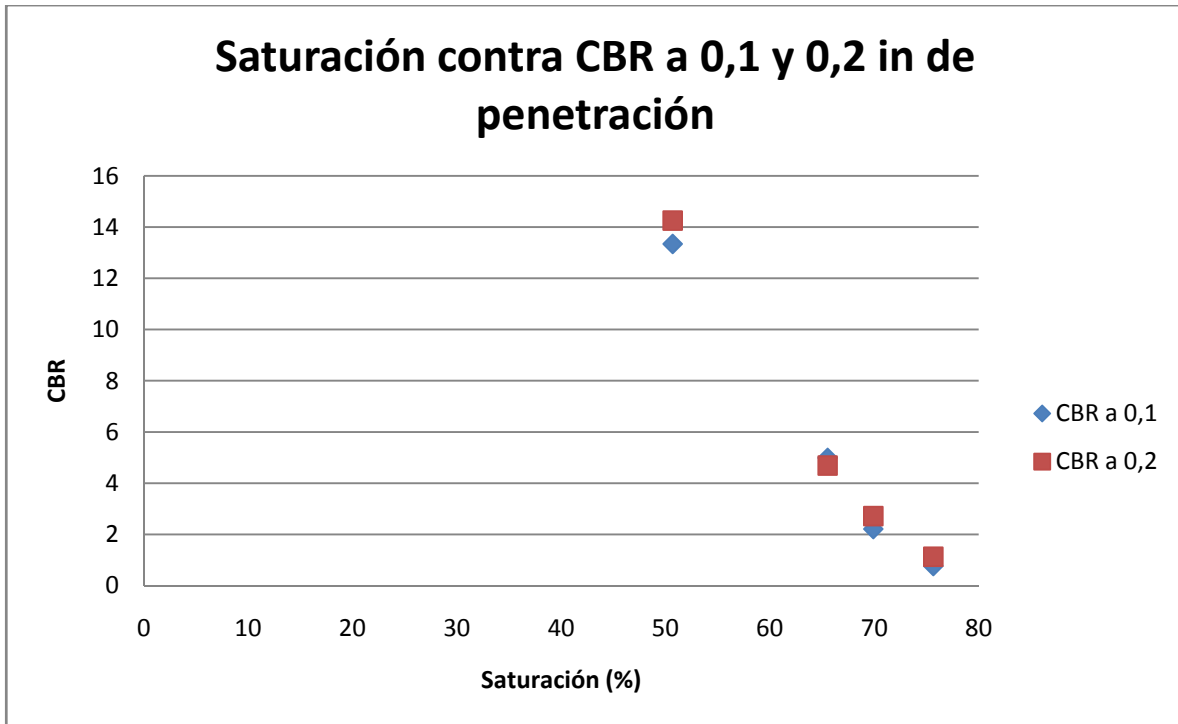
**Figura 14R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 2+700 a una relación de vacíos de 1,17.



**Figura 15R.** Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,30, falladas en la máquina de CBR. Estación 2+700.

**CUADRO 18R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,30, EN LA ESTACIÓN 2+700.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	50,7	13,3	14,2
P2	65,5	5,0	4,7
P3	75,6	0,8	1,1
P4	69,9	2,2	2,7



**Figura 16R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 2+700 a una relación de vacíos de 1,30.



## Conformación de probetas por sub-Compactación en la estación 1+900 (IM-SBE-10-095)

Se muestra el número de capas y el porcentaje de sub-compactación.

CUADRO 19R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 1+900, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,23 Y UNA DENSIDAD DEL 95% DEL PROCTOR.							
Punto 1 y 4		Punto 2		Punto 3			
Molde 1		Molde 31		Molde 8			
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)		
15,207	11,767	15,189	11,705	15,213	11,676		
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	
1	20,000	1,765	20,000	1,756	20,000	1,751	
2	17,143	3,194	17,143	3,177	17,143	3,169	
3	14,286	4,623	14,286	4,599	14,286	4,587	
4	11,429	6,052	11,429	6,020	11,429	6,005	
5	8,571	7,481	8,571	7,441	8,571	7,423	
6	5,714	8,910	5,714	8,863	5,714	8,840	
7	2,857	10,338	2,857	10,284	2,857	10,258	
8	0,000	11,767	0,000	11,705	0,000	11,676	

**CUADRO 20R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 1+900, PARA UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,18 Y UNA DENSIDAD DEL 97% DEL PROCTOR.**

n	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Molde 8		Molde 31		Molde 1		Molde 36	
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15,213	11,676	15,189	11,705	15,207	11,767	11,748	11,667
U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	
1	20,000	1,274	20,000	1,277	20,000	1,284	20,000	1,282
2	18,000	2,314	18,000	2,320	18,000	2,332	18,000	2,328
3	16,000	3,354	16,000	3,363	16,000	3,380	16,000	3,375
4	14,000	4,394	14,000	4,405	14,000	4,429	14,000	4,422
5	12,000	5,435	12,000	5,448	12,000	5,477	12,000	5,468
6	10,000	6,475	10,000	6,491	10,000	6,526	10,000	6,515
7	8,000	7,515	8,000	7,534	8,000	7,574	8,000	7,561
8	6,000	8,555	6,000	8,577	6,000	8,622	6,000	8,608
9	4,000	9,596	4,000	9,620	4,000	9,671	4,000	9,655
10	2,000	10,636	2,000	10,662	2,000	10,719	2,000	10,701
11	0,000	11,676	0,000	11,705	0,000	11,767	0,000	11,748

**CUADRO 21R. CARACTERISTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,23. ESTACIÓN 1+900**

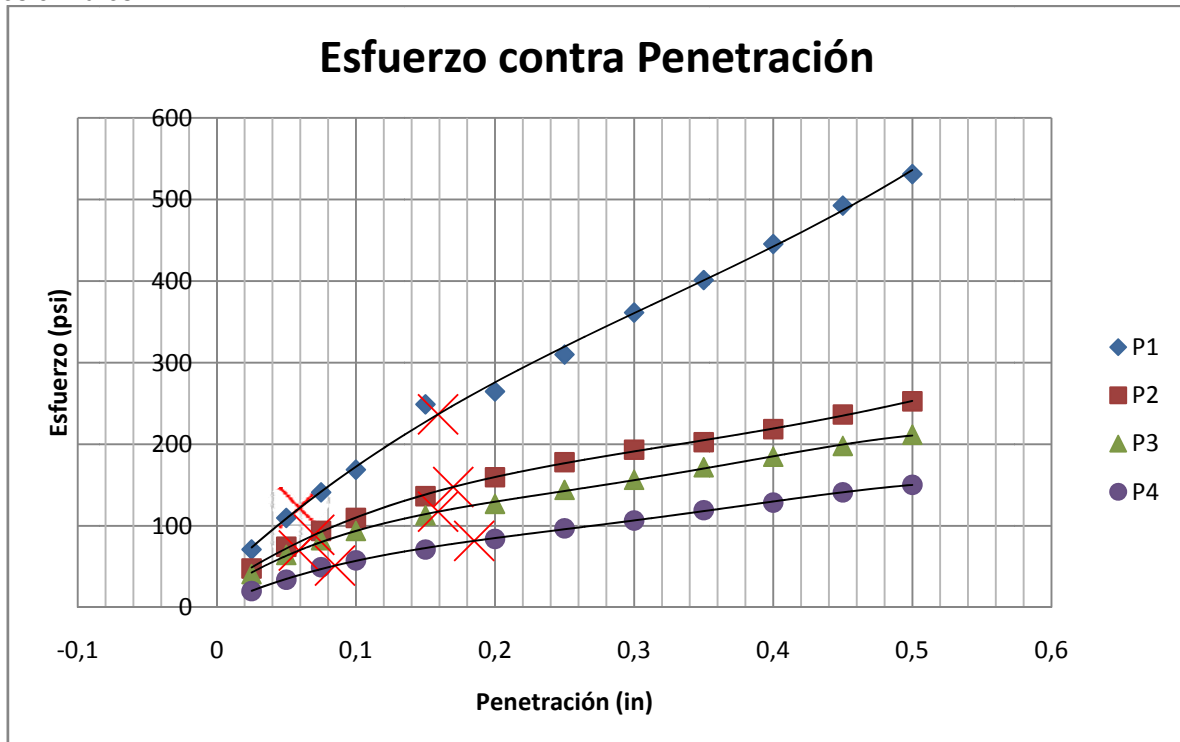
	Pruebas			
	1	2	3	4
Y <sub>humedo</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1567,5	1603,0	1634,9	1693,8
Y <sub>seco</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1198,1	1192,5	1195,0	1193,8
Humedad (%)	30,8	34,4	36,8	41,9
e	1,22	1,23	1,22	1,22
Saturación (S)	0,67	0,75	0,80	0,91

**CUADRO 22R. CARACTERISTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,18. ESTACIÓN 1+900**

	Pruebas			
	1	2	3	4
$\gamma_{humedo}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1531,3	1621,8	1675,1	1649,5
$\gamma_{seco}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1225,3	1225,3	1219,5	1223,9
Humedad (%)	25,0	32,4	37,4	34,8
e	1,17	1,17	1,18	1,17
Saturación (S)	0,57	0,74	0,85	0,79

### Curva de saturación contra CBR, para la estación 1+900 (IM-SBE-10-095)

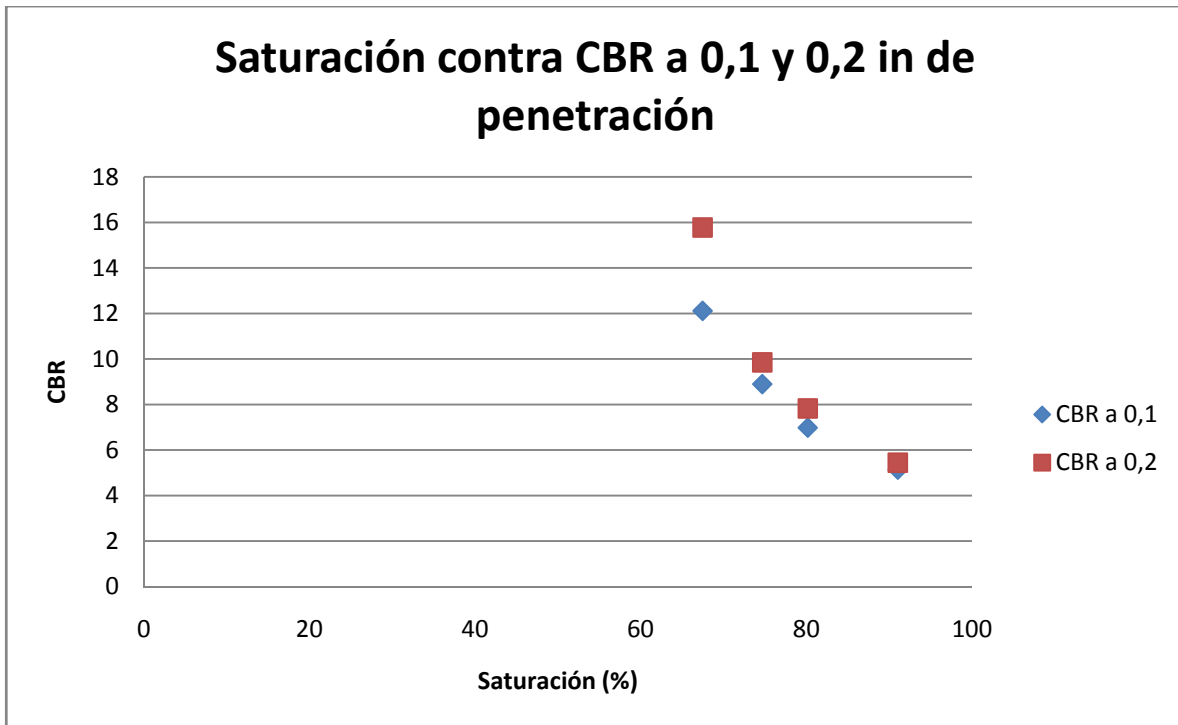
Se muestra los valores de CBR para las diferentes saturaciones para cada conformación de los cilindros.



**Figura 17R.** Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,23, falladas en la máquina de CBR. Estación 1+900.

**CUADRO 23R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,23, EN LA ESTACIÓN 1+900.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	67,5	12,1	15,8
P2	74,7	8,9	9,8
P3	80,2	7,0	7,8
P4	91,0	5,1	5,4



**Figura 18R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 1+900 a una relación de vacíos de 1,23.

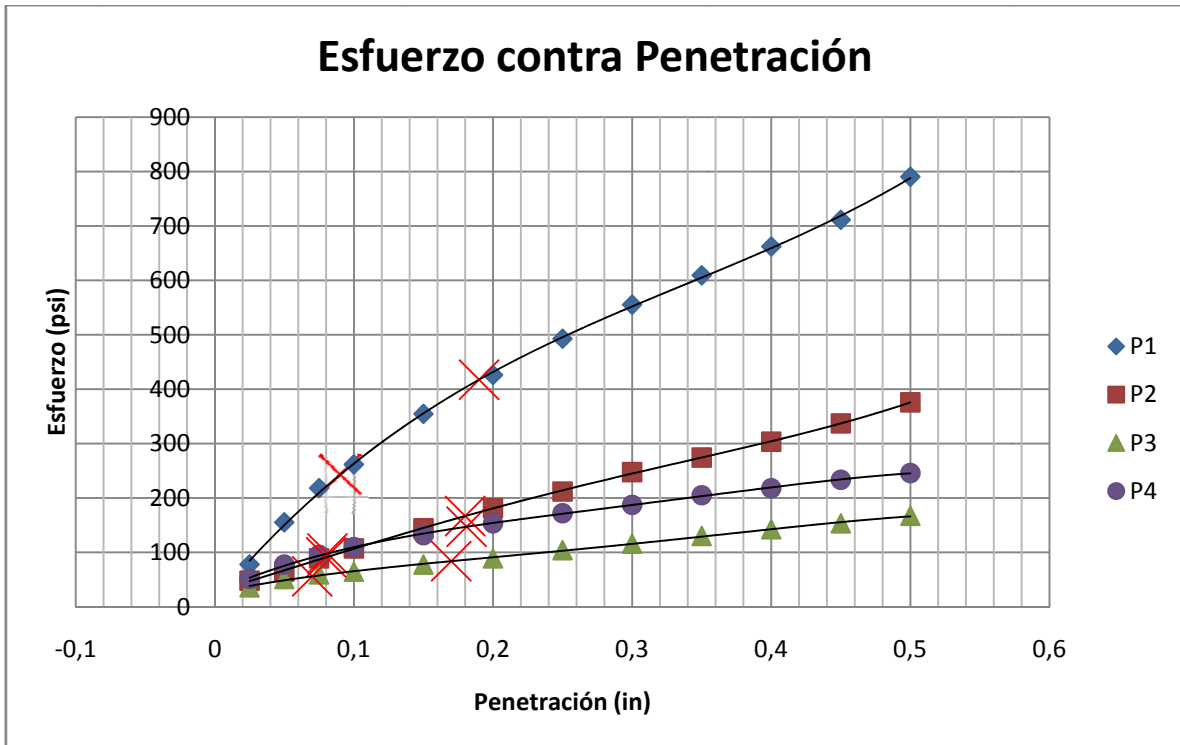
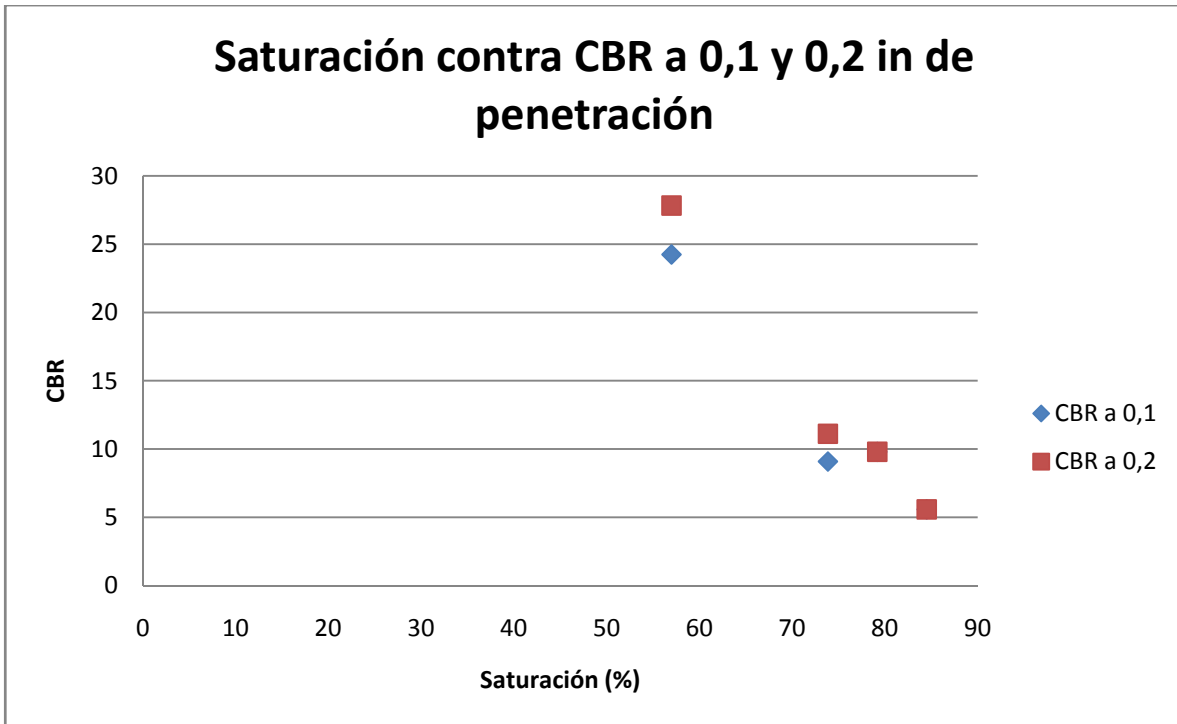


Figura 19R. Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,18, falladas en la máquina de CBR. Estación 1+900.

**CUADRO 24R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,18, EN LA ESTACIÓN 1+900.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	57,0	24,2	27,8
P2	73,8	9,1	11,1
P3	84,5	5,6	5,6
P4	79,2	9,8	9,8



**Figura 20R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 1+900 a una relación de vacíos de 1,18.

## Conformación de probetas por sub-Compactación en la estación 1+000 (IM-SBE-10-096)

Se muestra el número de capas y el porcentaje de sub-compactación.

**CUADRO 25R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 1+000, PARA UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,18 Y UNA DENSIDAD DEL 95% DEL PROCTOR.**

	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Molde 8		Molde 31		Molde 1		Molde 36	
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15,213	11,676	15,189	11,705	15,207	11,767	15,208	11,748
n	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>
1	20,000	1,751	20,000	1,756	20,000	1,765	20,000	1,762
2	17,143	3,169	17,143	3,177	17,143	3,194	17,143	3,189
3	14,286	4,587	14,286	4,599	14,286	4,623	14,286	4,615
4	11,429	6,005	11,429	6,020	11,429	6,052	11,429	6,042
5	8,571	7,423	8,571	7,441	8,571	7,481	8,571	7,468
6	5,714	8,840	5,714	8,863	5,714	8,910	5,714	8,895
7	2,857	10,258	2,857	10,284	2,857	10,338	2,857	10,321
8	0,000	11,676	0,000	11,705	0,000	11,767	0,000	11,748

**CUADRO 26R. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SUBCOMPACTACIÓN PARA CADA PUNTO Y MOLDE USADO PARA LA ESTACIÓN 1+000, PARA UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,07 Y UNA DENSIDAD DEL 100% DEL PROCTOR.**

n	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	Molde 8		Molde 31		Molde 1		Molde 36	
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
	15,213	11,676	15,189	11,705	15,207	11,767	11,748	11,667
U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	U <sub>n</sub>	h <sub>n</sub>	
1	20,000	1,274	20,000	1,277	20,000	1,284	20,000	1,282
2	18,000	2,314	18,000	2,320	18,000	2,332	18,000	2,328
3	16,000	3,354	16,000	3,363	16,000	3,380	16,000	3,375
4	14,000	4,394	14,000	4,405	14,000	4,429	14,000	4,422
5	12,000	5,435	12,000	5,448	12,000	5,477	12,000	5,468
6	10,000	6,475	10,000	6,491	10,000	6,526	10,000	6,515
7	8,000	7,515	8,000	7,534	8,000	7,574	8,000	7,561
8	6,000	8,555	6,000	8,577	6,000	8,622	6,000	8,608
9	4,000	9,596	4,000	9,620	4,000	9,671	4,000	9,655
10	2,000	10,636	2,000	10,662	2,000	10,719	2,000	10,701
11	0,000	11,676	0,000	11,705	0,000	11,767	0,000	11,748

**CUADRO 27R. CARACTERISTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,18. ESTACIÓN 1+000**

	Pruebas			
	1	2	3	4
Y <sub>humedo</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1587,8	1480,4	1642,4	1701,0
Y <sub>seco</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1206,3	1203,3	1215,2	1216,4
Humedad (%)	31,6	23,0	35,1	39,8
e	1,18	1,18	1,16	1,16
Saturación (S)	0,71	0,51	0,80	0,91

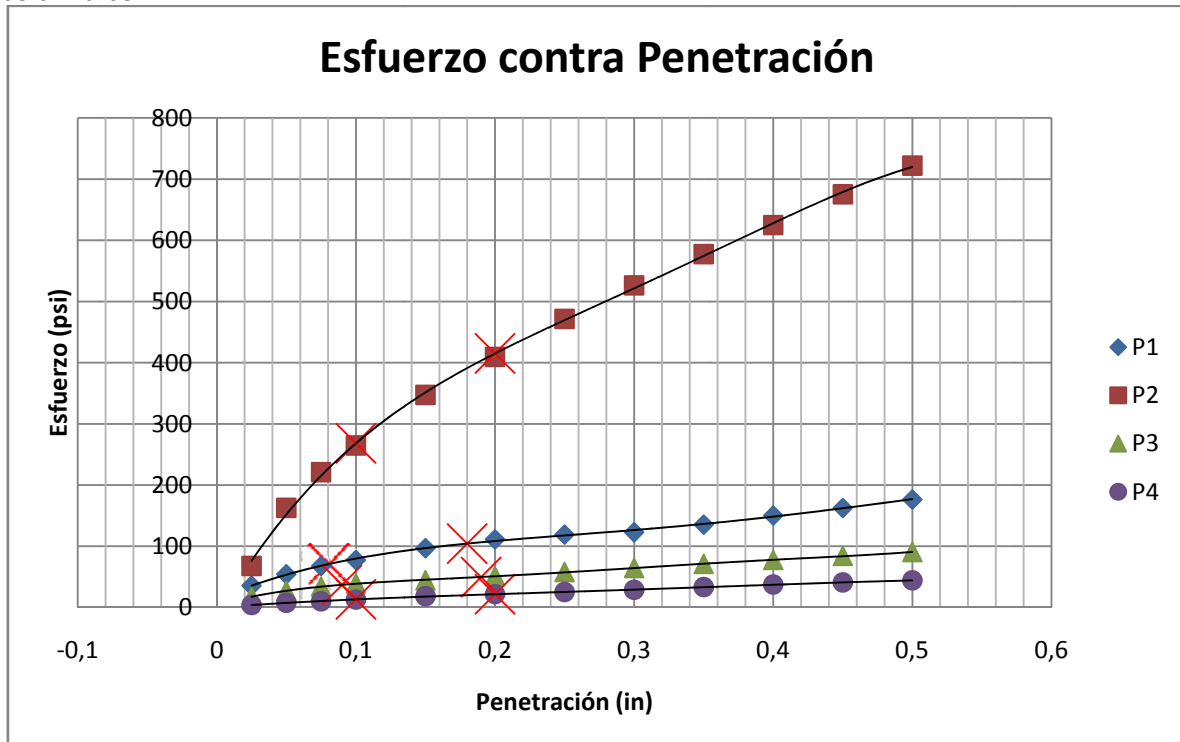


**CUADRO 28R. CARACTERÍSTICAS ALCANZADAS CON LA CONFORMACIÓN DE PROBETAS POR SUBCOMPACTACIÓN, PARA UNA RELACIÓN DE VACÍOS DE 1,07. ESTACIÓN 1+000**

	Pruebas			
	1	2	3	4
$\gamma_{humedo}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1616,1	1659,5	1698,5	1724,4
$\gamma_{seco}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1267,3	1268,6	1268,9	1267,3
Humedad (%)	27,5	30,8	33,9	36,1
e	1,07	1,07	1,07	1,07
Saturación (S)	0,68	0,76	0,83	0,89

**Curva de saturación contra CBR, para la estación 1+000 (IM-SBE-10-096)**

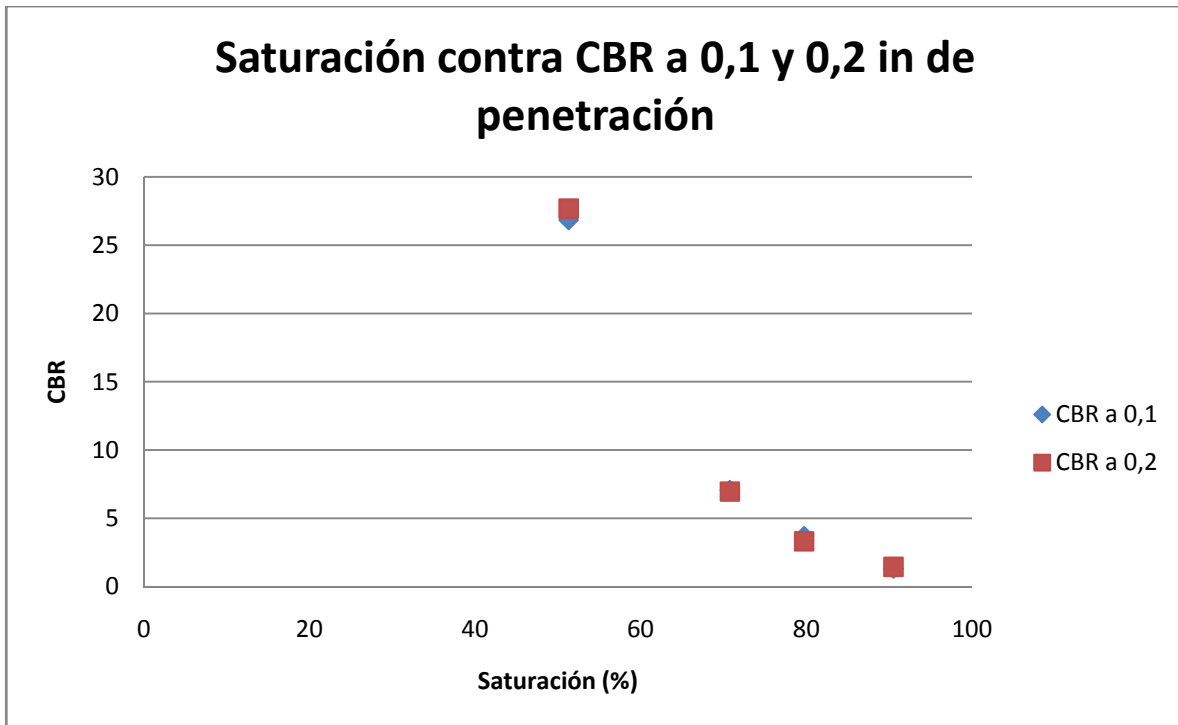
Se muestra los valores de CBR para las diferentes saturaciones para cada conformación de los cilindros.



**Figura 21R.** Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,18, falladas en la máquina de CBR. Estación 1+000.

**CUADRO 29R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,18, EN LA ESTACIÓN 1+000.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	70,8	7,1	7,0
P2	51,3	26,8	27,7
P3	79,7	3,7	3,3
P4	90,5	1,3	1,4



**Figura 22R.** Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 1+000 a una relación de vacíos de 1,18.

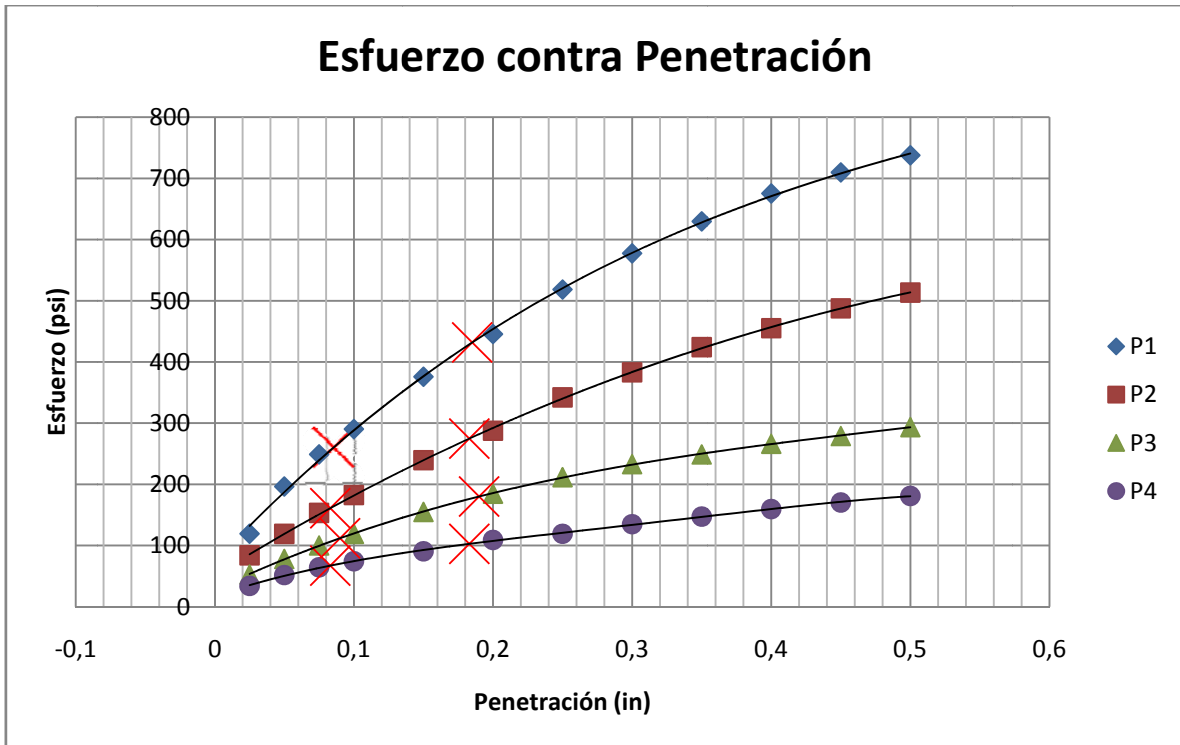


Figura 23R. Curvas de penetración versus esfuerzo, para probetas preparadas a diferentes saturaciones con una relación de vacíos de 1,07, falladas en la máquina de CBR. Estación 1+000.

**CUADRO 30R. VALORES DE CBR PARA DIFERENTES SATURACIONES, CON UNA RELACIÓN DE VACIOS DE 1,07, EN LA ESTACIÓN 1+000.**

Prueba	Saturación (%)	CBR	
		0,1"	0,2"
P1	67,7	25,9	28,8
P2	75,9	16,1	18,3
P3	83,4	11,2	12,0
P4	88,7	6,7	6,8

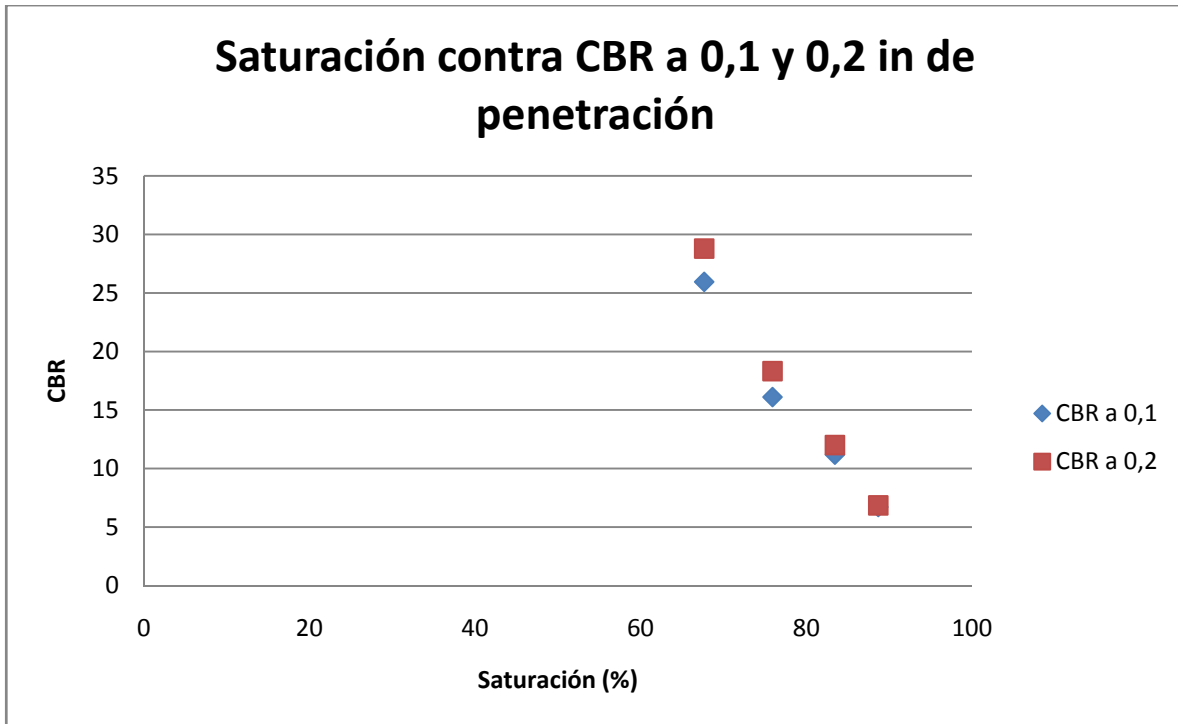


Figura 24R. Curvas de saturación versus porcentaje de CBR, para 0,1 y 0,2 pulgadas de penetración, para la estación 1+000 a una relación de vacíos de 1,07.

## Relación de saturación, densidad específica seca y CBR

Con los gráficos generados de la prueba de CBR del laboratorio y la prueba de CBR conformada

por sub-compactación, se construyen los gráficos de CBR dependientes de dos variables, la densidad específica seca y la saturación. Se realizó curvas de densidad seca contra CBR y saturación.

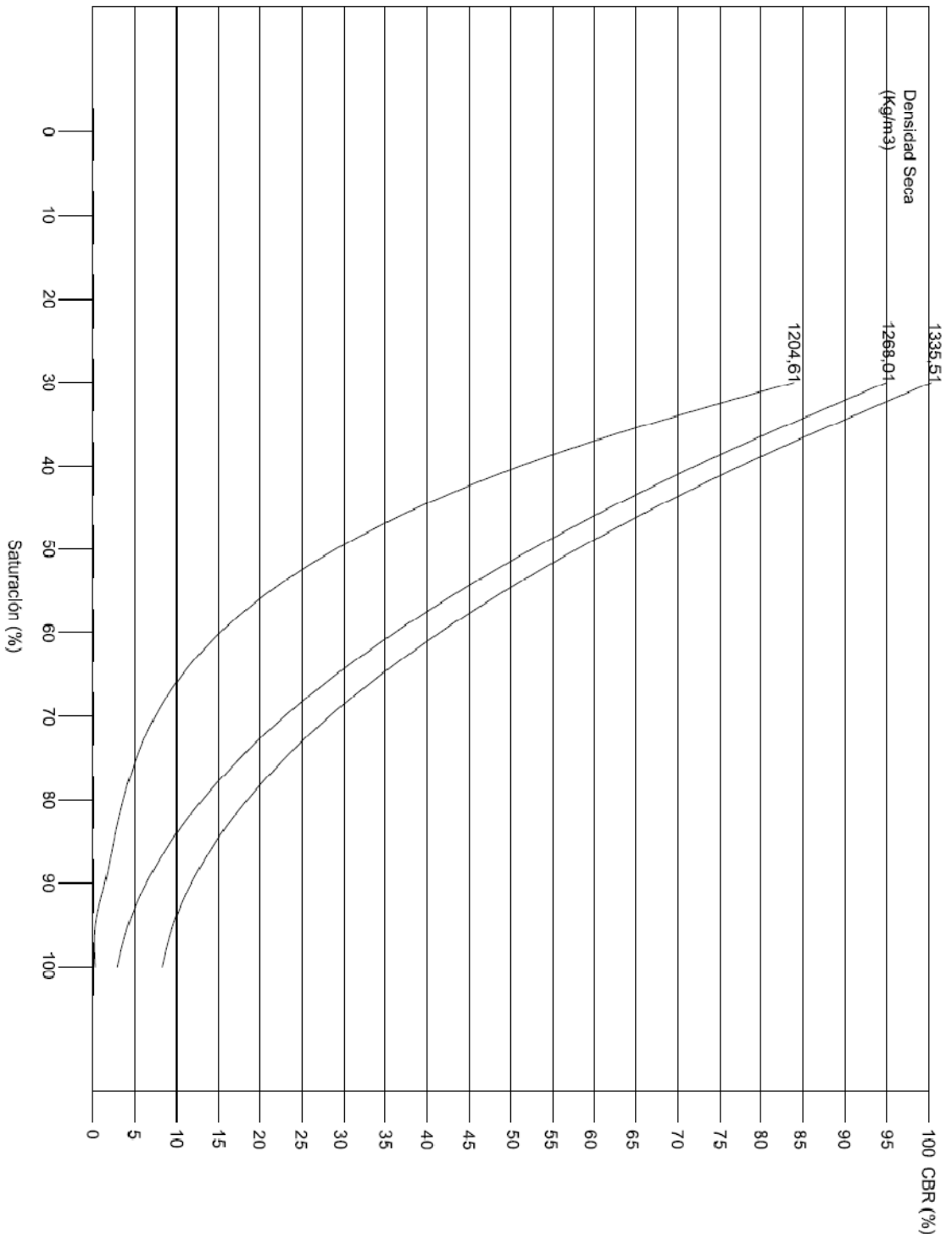


Figura 25R. Curvas de densidad a diferentes saturaciones y porcentaje de CBR para la estación 1+000.

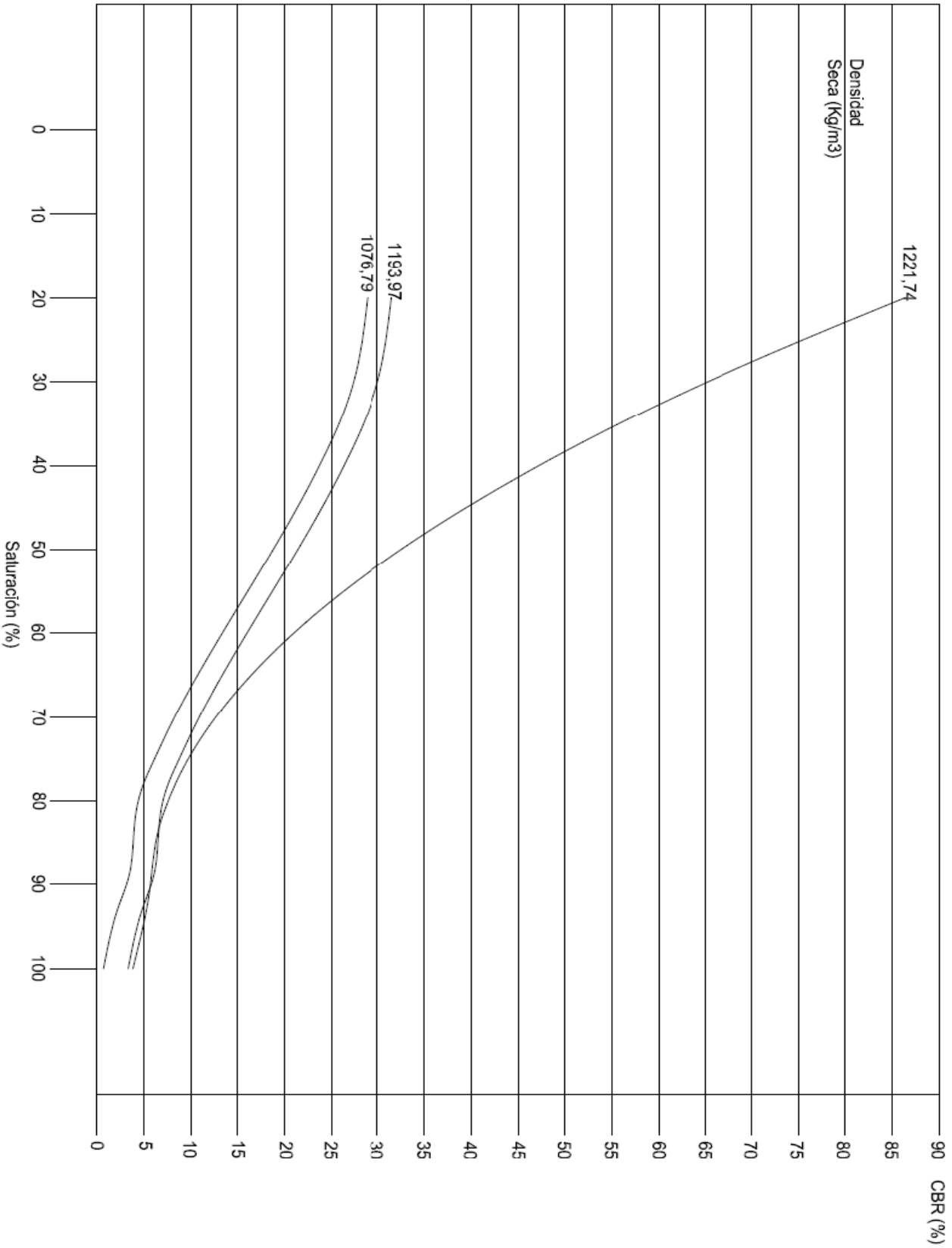


Figura 26R. Curvas de densidad a diferentes saturaciones y porcentaje de CBR para la estación 1+900.

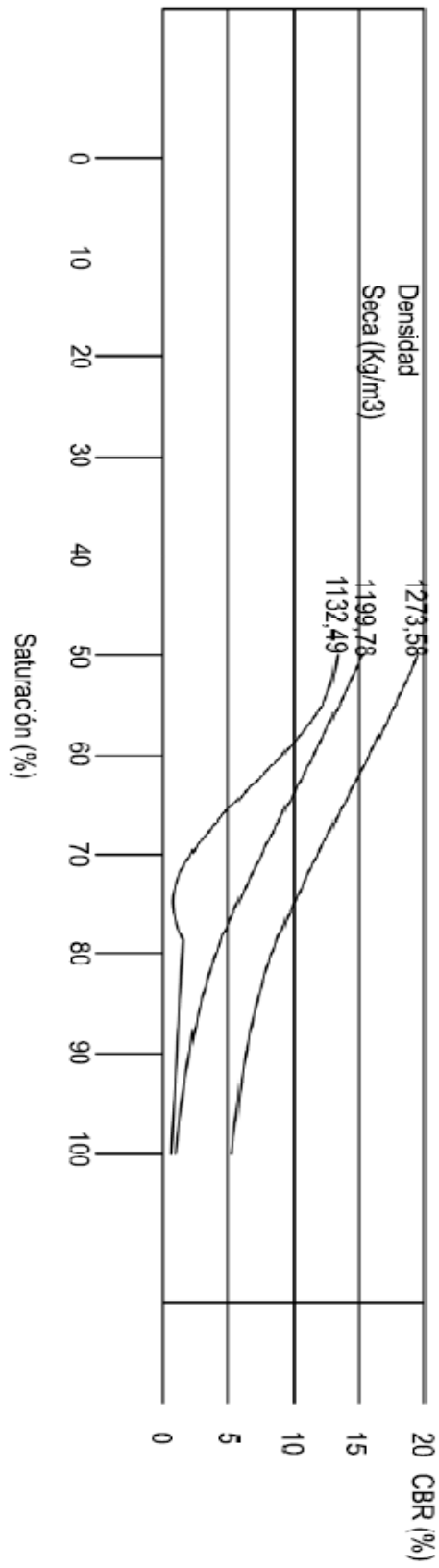


Figura 27R. Curvas de densidad a diferentes saturaciones y porcentaje de CBR para la estación 2+700.

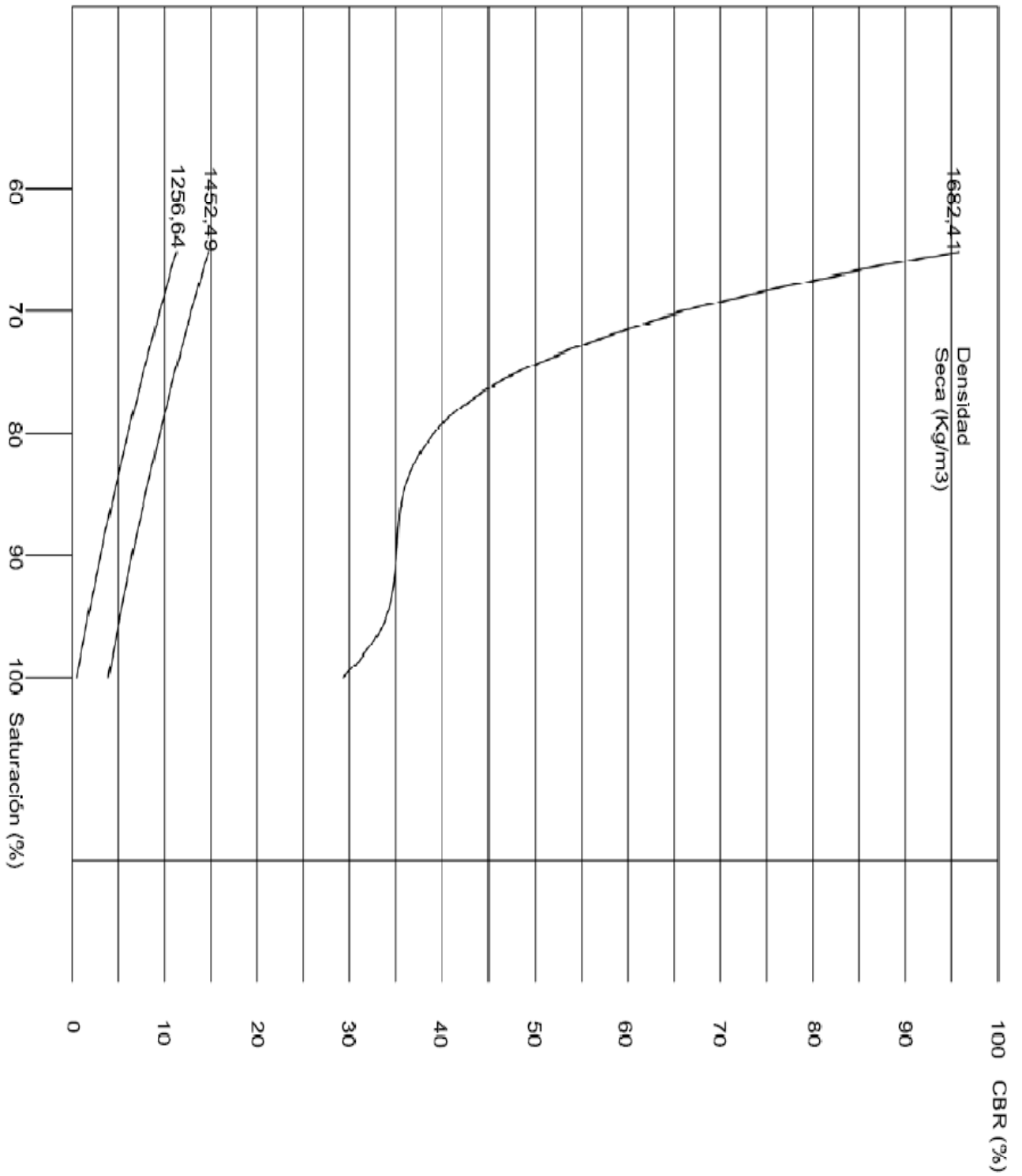


Figura 28R. Curvas de densidad a diferentes saturaciones y porcentaje de CBR para la estación 3+900.



## Prueba de CBR de campo

Para cada estación de la carretera en estudio se procedió a determinar el CBR de campo según la norma ASTM D4429-07. Teniendo cuidado de las posibles fuentes de error para realizar la prueba.

Para la estación 3+900, se tuvo que realizar la prueba a 150 metros antes, ya que, por las condiciones de la carretera era imposible colocar el camión en la posición adecuada para la ejecución de la prueba.

En cada estación se realizaron tres pruebas de CBR a cada 50 centímetros, con el fin de comprobar los resultados y ver la variación de estos, también se realizó una prueba de densidad del cono de arena, que por medio de las humedades recuperadas en cada prueba, se determinó la densidad seca en el sitio que se hizo dicha prueba de CBR.

En los cuadros se caracteriza cada prueba de CBR realizada, se determina a que densidad se encuentra, saturación y la relación de vacíos que presentan.

**CUADRO 31R. VALOR DE CBR DE CAMPO SEGÚN ASTM D4429-07, PARA LA ESTACIÓN 3+750, A LA CUAL SE LES HICIERON TRES PRUEBAS SEPARADAS A 0,5 METROS DE RADIO, LAS CUALES SE LES CARACTERIZÓ PROPIEDADES DIFERENTES.**

N° Prueba	Densidad Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	% Proctor	CBR	
					0,1"	0,2"
1	1537,4	0,66	95,2	100,6	12,7	12,9
2	1533,1	0,66	96,5	100,3	10,0	12,4
3	1528,2	0,67	97,3	100,0	11,6	15,1

**CUADRO 32R. VALOR DE CBR DE CAMPO SEGÚN ASTM D4429-07, PARA LA ESTACIÓN 2+700, A LA CUAL SE LES HICIERON TRES PRUEBAS SEPARADAS A 0,5 METROS DE RADIO, LAS CUALES SE LES CARACTERIZÓ PROPIEDADES DIFERENTES.**

N° Prueba	Densidad Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	% Proctor	CBR	
					0,1"	0,2"
1	1282,4	1,03	91,0	101,6	4,6	4,6
2	1301,9	1,00	96,9	103,1	5,9	6,1
3	1310,5	0,98	95,8	103,8	5,9	4,6

**CUADRO 33R. VALOR DE CBR DE CAMPO SEGÚN ASTM D4429-07, PARA LA ESTACIÓN 1+900, A LA CUAL SE LE HICIERON TRES PRUEBAS SEPARADAS A 0,5 METROS DE RADIO, LAS CUALES SE LES CARACTERIZÓ PROPIEDADES DIFERENTES.**

N° Prueba	Densidad Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	% Proctor	CBR	
					0,1"	0,2"
1	1287,9	1,07	98,3	102,5	18,4	16,6
2	1288,4	1,06	98,2	102,5	12,6	12,3
3	1291,8	1,06	97,8	102,8	8,3	9,2

**CUADRO 34R. VALOR DE CBR DE CAMPO SEGÚN ASTM D4429-07, PARA LA ESTACIÓN 1+000, A LA CUAL SE LES HICIERON TRES PRUEBAS SEPARADAS A 0,5 METROS DE RADIO, LAS CUALES SE LES CARACTERIZÓ PROPIEDADES DIFERENTES.**

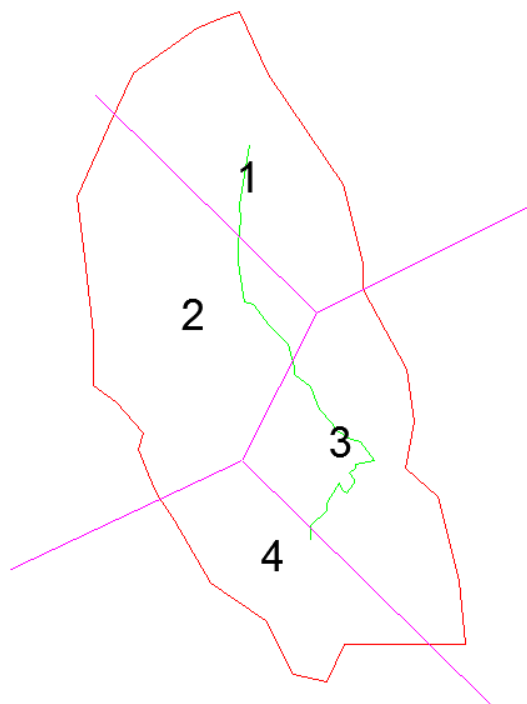
N° Prueba	Densidad Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	% Proctor	CBR	
					0,1"	0,2"
1	1232,1	1,13	78,2	98,0	14,0	15,0
2	1222,0	1,15	79,5	97,2	14,1	14,5
3	1288,0	1,04	70,5	102,5	7,1	9,6

## Saturación del suelo según las condiciones climáticas

Para poder determinar la saturación del suelo, se tuvieron que identificar, en la cuenca, las diferentes regiones con características específicas de precipitación, geología y

temperatura, para poder aplicar el método de Schosinsky (2007) de balance hídrico, con variaciones, para poder calcular la saturación del suelo en los diferentes meses del año.

Para determinar las regiones de precipitación, se utilizó el método de polígonos de Thiessen mejorado, según como se ve en la figura 29R, para cada mes del año se determinó la precipitación media de cada polígono.



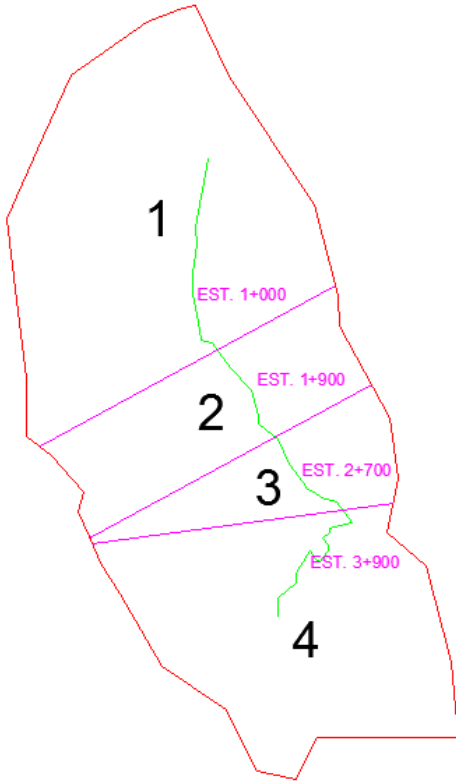
**Figura 29R.** Polígonos de Thiessen para la precipitación mensual. (Bustillos, 2010).

**CUADRO 35R. PRECIPITACIÓN MEDIA EN MM DETERMINADO POR LOS POLÍGONOS DE THIESSEN MEJORADO PARA CADA MES DEL AÑO, PARA LA CONDICIÓN MOSTRADA EN LA FIGURA 29R.**

P	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Diciembre
1	97,45	52,39	45,68	94,12	327,57	276,14	159,67	224,95	370,99	438,82	218,61	150,74
2	85,58	71,52	56,19	115,63	344,64	301,65	196,85	268,83	385,99	470,05	242,60	175,19
3	151,70	116,06	94,89	126,22	369,98	287,03	240,42	347,63	396,18	402,31	299,67	186,77
4	110,90	82,86	94,21	126,52	392,58	321,29	267,37	385,55	429,53	465,28	276,71	223,19

En anexos se encontrarán todas las figuras que representan los datos de precipitación para cada mes.

Las características geológicas del suelo, fueron determinadas por varias pruebas de laboratorio, las muestras fueron tomadas a los 1900, 2700 y 3900 metros, las regiones que se supone que tienen las mismas características del suelo se determinaron como áreas tributarias, como se muestra en la figura 30R.



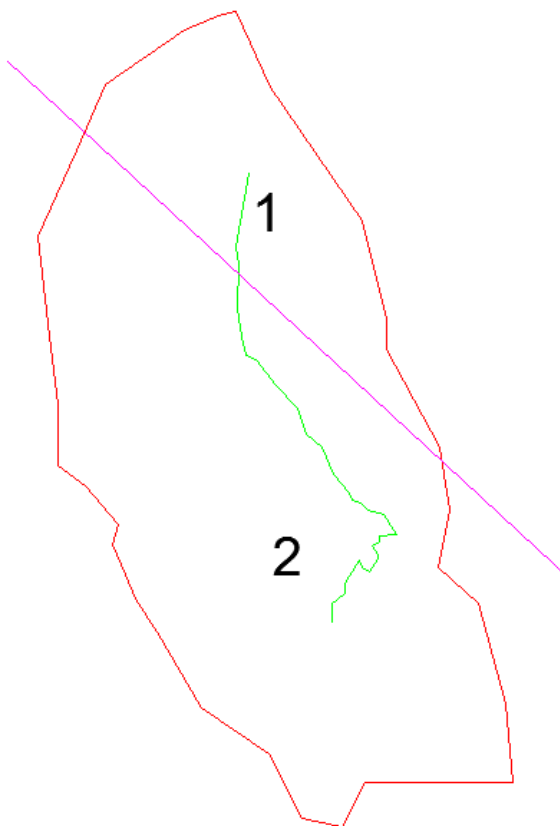
**Figura 30R.** Regiones que comparten características geológicas similares, determinado por áreas tributarias. (Bustillos, 2010).

En el cuadro 36R, se muestra las características presentes en cada región, figura 30R, necesarias para determinar la saturación del suelo, además de la pendiente media del terreno. Todos los datos son tomados de la investigación de Schosinsky (2007).

<b>CUADRO 36R. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS PARA CADA POLÍGONO DE LA FIGURA 30R.</b>				
	Polígonos			
	1	2	3	4
Pendiente (%)	3,94	4,01	9,45	12,34
Coeficientes infiltración				
$k_{fc}$ (textura del suelo)	0,40	0,40	0,40	0,10
$k_v$ (cobertura vegetal)	0,21	0,21	0,21	0,21
$k_p$ (pendiente)	0,10	0,10	0,06	0,06
Punto de marchitez (PM, %)	15,00	15,00	15,00	17,00
Capacidad campo (CC, %)	29,00	29,00	29,00	35,00
Retención de follaje (Cfo, %)	12,00	12,00	12,00	12,00
Gravedad específica ( $G_s$ )	2,63	2,66	2,60	2,55
Densidad seca ( $\gamma_d$ , g/cm <sup>3</sup> )	1,33	1,22	1,13	1,41
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,30	1,30	1,30	1,25

Para determinar las regiones para temperatura se utilizó el método de polígonos de Thiessen, ver figura 31R. El Instituto Meteorológico Nacional proporcionó información de estaciones cercanas las cuales no contaron con datos de temperatura suficientes para zona en estudio y que estas estén cercanas, por lo que se tuvieron que usar datos de una estación lejana, por lo que solo se originaron dos polígonos.

Los datos del cuadro 36R fueron tomados del trabajo de Schosinsky (2007), los cuales son valores aproximados.

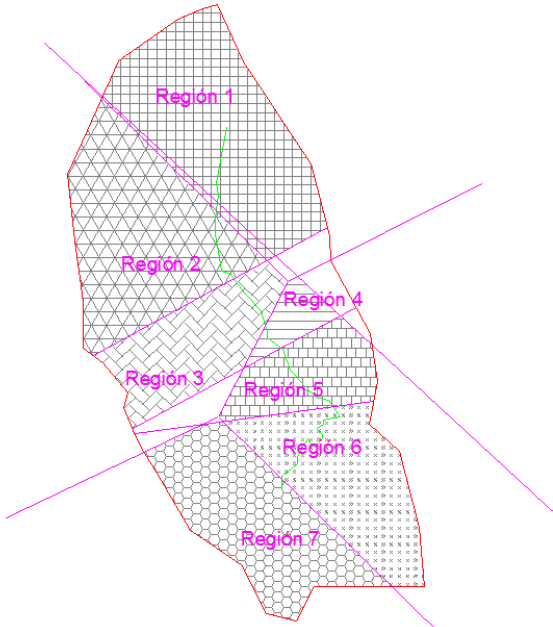


**Figura 31R.** Polígonos de temperatura, la cual divide en dos tramos la carretera para el análisis. (Bustillos, 2010).

**CUADRO 37R. TEMPERATURA MEDIA EN GRADOS CENTIGRADOS PARA CADA MES DEL AÑO, PARA CADA POLÍGONO MOSTRADO EN LA FIGURA 31R.**

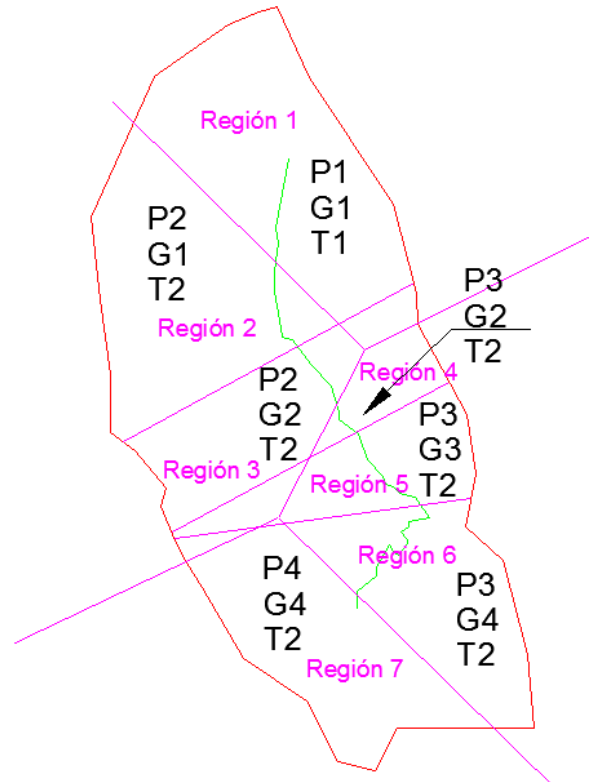
P	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Set.	Octubre	Nov.	Diciembre
1	17,7	18,1	18,9	19,7	20,6	20,9	19,8	20,1	20,4	20,3	19,2	18,2
2	18	18,35	19,1	19,75	20,55	20,55	19,95	20,1	20,55	20,45	19,4	18,65

Si se trasponen los polígonos formados anteriormente se forman 7 regiones (figura 32R) las cuales dividen en tramos la carretera en estudio, los cuales son de características diferentes.



**Figura 32R.** Intersecciones de polígonos de precipitación, geología y temperatura, para formar siete regiones las cuales dividen en tramos la carretera en estudio. (Bustillos, 2010).

En la figura 32R, muestra el área que abarca las regiones formadas por los polígonos de precipitación, geología y temperatura. En la figura 33R muestra las características que cada región tiene las cuales son necesarias para el cálculo de la saturación en las condiciones críticas ambientales, es decir la época más lluviosa según el pronóstico hecho para la carretera en estudio.



**Figura 33R.** Regiones de la cuenca de la carretera en estudio las que se identifican con letras y números las condiciones de precipitación (P), geología (G) y temperatura (T). (Bustillos, 2010).

**CUADRO 38R. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REGIONES QUE SE FORMAN DE LA SUPERPOSICIÓN DE LOS POLÍGONOS DE PRECIPITACIÓN, GEOLOGÍA Y TEMPERATURA. VER FIGURA 33R.**

Regiones	Polígono		
	Precipitación (P) (Cuadro 35R)	Geología (G) (Cuadro 36R)	Temperatura (T) (Cuadro 37R)
1	1	1	1
2	2	1	2
3	2	2	2
4	3	2	2
5	3	3	2
6	3	4	2
7	4	4	2

En el cuadro 38R, se muestra un resumen de las características de las regiones, haciendo referencia a los cuadros 35R, 36R y 37R, con el número del polígono se hace referencia de las características de precipitación, temperatura y propiedades del suelo, según el número que se le asigna a cada fila.

Así por ejemplo la región tres, o sea la fila número tres de arriba hacia abajo del cuadro 38R, dice en la columna de precipitación un dos, lo que representa es que en el cuadro 35R, el que corresponde a las características de la lluvia caída, en la columna "P" hay un dos, es la fila número dos de arriba hacia abajo, lo que indica que el polígono dos formado en la figura 29R, da las características de precipitación del año. Siguiendo en el cuadro 38R, en la columna de Geología en la misma fila se tiene un dos, lo que indica es que en la región tres va contar con propiedades del suelo iguales a los encontrados en el cuadro 36R en la columna tres de derecha a izquierda, donde se encuentra la pendiente, coeficientes de infiltración entre otros. Para la columna de temperatura en el cuadro 38R en la tercer fila se encuentra el número dos, lo que indica es que en cuadro 37R en la fila dos de arriba hacia abajo están las temperaturas medias para los meses del año. Así se caracteriza cada región según el cuadro que se haga referencia si es de geología, temperatura e identifica el número de polígono en cada cuadro y estos se deben buscar en los cuadros correspondientes.

## **Balance hídrico**

Se aplicó el método de balance hídrico dado por Schosinsky y Losilla (2007), con el propósito de encontrar la humedad inicial y final de cada mes, para un escenario lluvioso que se determinó por la metodología dada por Villalobos y Retada (1997). Con la humedad promedio se determina la saturación del suelo para las condiciones de cada región, los cuales difieren en la intensidad de la precipitación para cada mes, propiedades geológicas y la temperatura.

Se presentará en cuadros los datos necesarios para determinar la humedad, saturación de cada mes del año, para cada región por la cual la carretera se ve afectada. Así poder determinar por medio de gráficas el CBR asociado a la saturación de cada tramo.



**CUADRO 39R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 1, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	166,06	137,53	112,60	113,15	184,69	188,50	179,95	185,27	188,50	188,50	188,50	178,03
wHD	141,41	101,29	68,57	73,91	220,31	259,72	190,76	223,00	319,56	365,17	227,59	185,18
ETR	72,85	61,27	53,47	58,25	133,12	152,14	108,31	135,22	144,24	145,24	133,75	104,65
wHsi	178,03	166,06	137,53	112,60	113,15	184,69	188,50	179,95	185,27	188,50	188,50	188,50
Pi	60,88	32,73	28,54	58,81	204,66	172,53	99,76	140,55	231,79	274,17	136,59	94,18
Ret	11,69	6,29	5,48	11,29	39,31	33,14	19,16	26,99	44,52	52,66	26,23	18,09
ETP	131,86	122,53	141,91	143,45	154,64	152,14	152,46	150,88	144,24	145,24	133,75	133,42
c1	1,00	1,00	0,75	0,81	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,10	0,00	0,00	0,00	0,72	1,00	0,42	0,79	1,00	1,00	1,00	0,57
ETR1	131,86	122,53	106,93	116,51	154,64	152,14	152,46	150,88	144,24	145,24	133,75	133,42
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	26,47	23,35	19,24	17,37	22,91	28,71	28,34	28,09	28,75	29,00	29,00	28,19

**CUADRO 40R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 2, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	165,34	148,25	116,05	116,54	186,81	188,50	183,72	188,50	188,50	188,50	188,50	181,89
wHD	137,86	112,53	85,86	90,80	234,37	277,78	213,99	254,18	332,17	384,69	242,58	200,46
ETR	70,02	61,78	67,31	71,76	145,06	150,96	127,77	151,08	144,81	146,01	134,66	116,06
wHsi	181,89	165,34	148,25	116,05	116,54	186,81	188,50	183,72	188,50	188,50	188,50	188,50
Pi	53,47	44,69	35,11	72,25	215,33	188,47	122,99	167,96	241,17	293,69	151,58	109,46
Ret	10,27	8,58	6,74	13,88	41,36	36,20	23,62	32,26	46,32	56,41	29,11	21,02
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,05	0,00	0,00	0,00	0,88	1,00	0,67	1,00	1,00	1,00	1,00	0,72
ETR1	133,17	123,56	134,62	143,52	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	26,71	24,12	20,33	17,89	23,33	28,87	28,63	28,63	29,00	29,00	29,00	28,49

**CUADRO 41R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 3, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	165,34	148,25	116,05	116,54	186,81	188,50	183,72	188,50	188,50	188,50	188,50	181,89
wHD	137,86	112,53	85,86	90,80	234,37	277,78	213,99	254,18	332,17	384,69	242,58	200,46
ETR	70,02	61,78	67,31	71,76	145,06	150,96	127,77	151,08	144,81	146,01	134,66	116,06
wHsi	181,89	165,34	148,25	116,05	116,54	186,81	188,50	183,72	188,50	188,50	188,50	188,50
Pi	53,47	44,69	35,11	72,25	215,33	188,47	122,99	167,96	241,17	293,69	151,58	109,46
Ret	10,27	8,58	6,74	13,88	41,36	36,20	23,62	32,26	46,32	56,41	29,11	21,02
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,05	0,00	0,00	0,00	0,88	1,00	0,67	1,00	1,00	1,00	1,00	0,72
ETR1	133,17	123,56	134,62	143,52	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	26,71	24,12	20,33	17,89	23,33	28,87	28,63	28,63	29,00	29,00	29,00	28,49

**CUADRO 42R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 4, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	176,93	168,39	156,34	163,28	188,50	188,50	188,05	188,50	188,50	188,50	188,50	183,76
wHD	181,04	151,95	130,18	137,70	296,94	270,34	241,21	307,75	338,53	342,36	278,24	207,69
ETR	101,61	81,05	71,34	71,92	154,64	150,96	150,67	151,08	144,81	146,01	134,66	121,44
wHsi	183,76	176,93	168,39	156,34	163,28	188,50	188,50	188,05	188,50	188,50	188,50	188,50
Pi	94,78	72,52	59,29	78,86	231,16	179,34	150,21	217,20	247,53	251,36	187,24	116,69
Ret	18,20	13,93	11,39	15,15	44,40	34,44	28,85	41,72	47,54	48,28	35,96	22,41
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,53	0,31	0,00	0,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80
ETR1	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	27,75	26,56	24,98	24,59	27,06	29,00	28,97	28,97	29,00	29,00	29,00	28,64

**CUADRO 43R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 5, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	175,04	166,48	151,09	153,59	188,50	188,50	186,70	188,50	188,50	188,50	188,50	182,06
wHD	174,00	145,97	124,93	128,01	274,23	260,24	232,75	294,16	324,59	328,20	267,69	201,12
ETR	96,46	76,99	71,34	71,92	154,64	150,96	143,55	151,08	144,81	146,01	134,66	116,56
wHsi	182,06	175,04	166,48	151,09	153,59	188,50	188,50	186,70	188,50	188,50	188,50	188,50
Pi	89,44	68,43	55,95	74,42	218,14	169,24	141,75	204,96	233,59	237,20	176,69	110,12
Ret	18,20	13,93	11,39	15,15	44,40	34,44	28,85	41,72	47,54	48,28	35,96	22,41
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,45	0,25	0,00	0,00	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73
ETR1	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
H <sub>prom</sub>	27,47	26,27	24,43	23,44	26,31	29,00	28,86	28,86	29,00	29,00	29,00	28,50

**CUADRO 44R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 6, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	164,28	149,45	133,36	130,85	173,99	185,10	184,08	194,91	204,62	208,52	199,75	181,47
wHD	124,61	95,82	74,10	68,21	145,07	161,20	157,13	191,02	217,66	229,36	199,84	154,30
ETR	66,58	52,62	46,99	43,60	77,32	82,35	79,30	102,36	119,29	127,09	106,34	79,08
wHsi	181,47	164,28	149,45	133,36	130,85	173,99	185,10	184,08	194,91	204,62	208,52	199,74
Pi	49,39	37,79	30,90	41,10	120,47	93,46	78,28	113,19	129,00	130,99	97,57	60,81
Ret	18,20	13,93	11,39	15,15	44,40	34,44	28,85	41,72	47,54	48,28	35,96	22,41
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	0,85	0,66	0,61	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,04	0,35	0,65	0,74	0,58	0,17
ETR1	133,17	105,24	93,98	87,21	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	27,66	25,10	22,62	21,14	24,39	28,73	29,53	30,32	31,96	33,05	32,66	30,50

**CUADRO 45R. BALANCE HÍDRICO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD Y SATURACIÓN, DE LA REGIÓN 7, DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.**

Balance hídrico												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
wHSf	156,18	140,93	130,16	129,73	180,24	190,82	188,72	200,49	210,48	217,77	200,86	186,66
wHD	116,52	76,91	65,35	65,10	151,31	178,60	171,63	208,00	234,10	255,72	202,60	167,28
ETR	66,58	42,24	41,44	41,62	77,32	94,02	89,16	113,76	129,87	144,20	107,99	86,87
wHsi	186,66	156,18	140,93	130,16	129,73	180,24	190,82	188,72	200,49	210,48	218,75	200,86
Pi	36,11	26,98	30,68	41,19	127,82	104,61	87,06	125,54	139,85	151,50	90,10	72,67
Ret	13,31	9,94	11,31	15,18	47,11	38,55	32,08	46,27	51,54	55,83	33,21	26,78
ETP	133,17	123,56	142,69	143,84	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
c1	1,00	0,68	0,58	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
c2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,16	0,51	0,79	0,98	0,60	0,29
ETR1	133,17	84,47	82,89	83,24	154,64	150,96	153,07	151,08	144,81	146,01	134,66	135,10
Humedad promedio según el mes (%)												
wH <sub>prom</sub>	27,43	23,77	21,69	20,79	24,80	29,68	30,36	31,14	32,88	34,26	33,57	31,00

# Variación de la densidad

densidad seca multiplicado por uno más el porcentaje de la humedad deseada.

Para cada estación se determinó cuánto va variar la densidad total para cada mes del año, tomando en cuenta la humedad calculada por medio del balance hídrico.

La densidad húmeda de las gráficas se calculó de forma teórica, en la relación de la

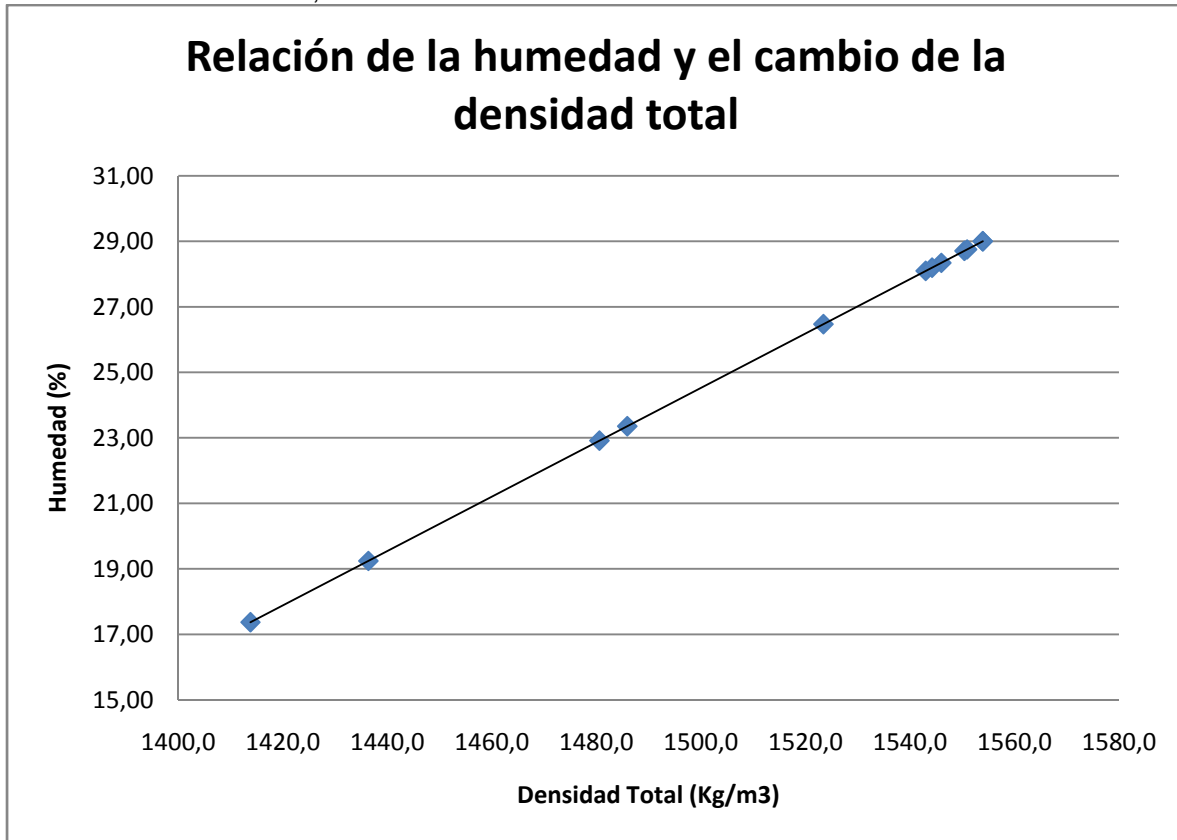


Figura 34R. Variación de la densidad total según la humedad para cada mes del año, en la estación 1+000.



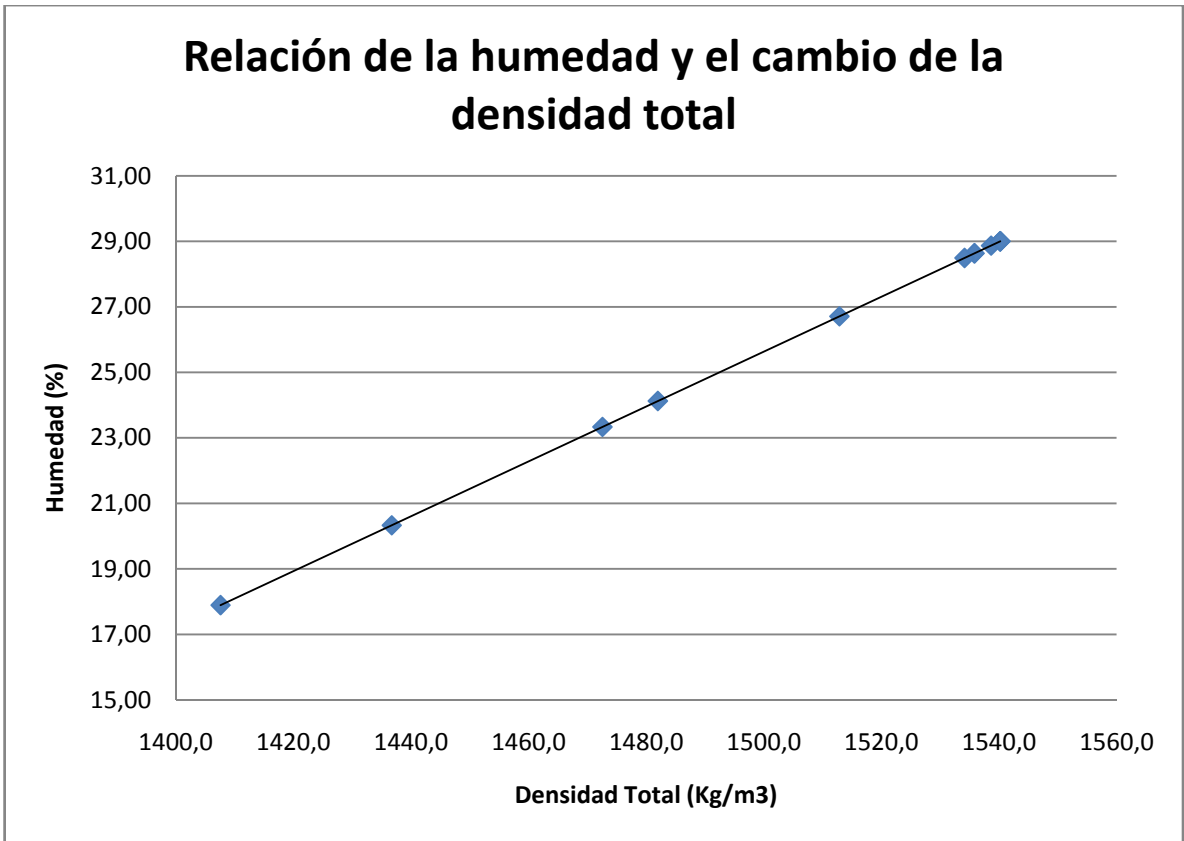
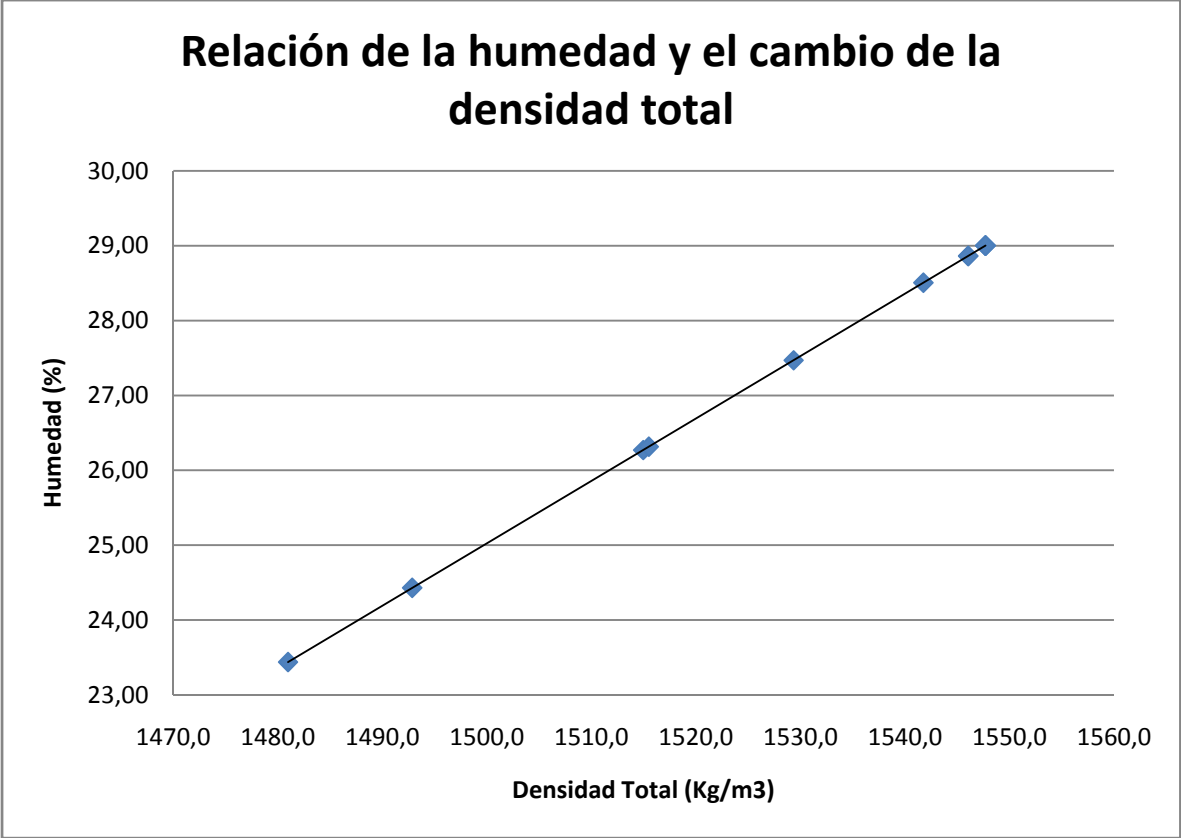


Figura 35R. Variación de la densidad total según la humedad para cada mes del año, en la estación 1+900.



**Figura 36R.** Variación de la densidad total según la humedad para cada mes del año, en la estación 2+700.

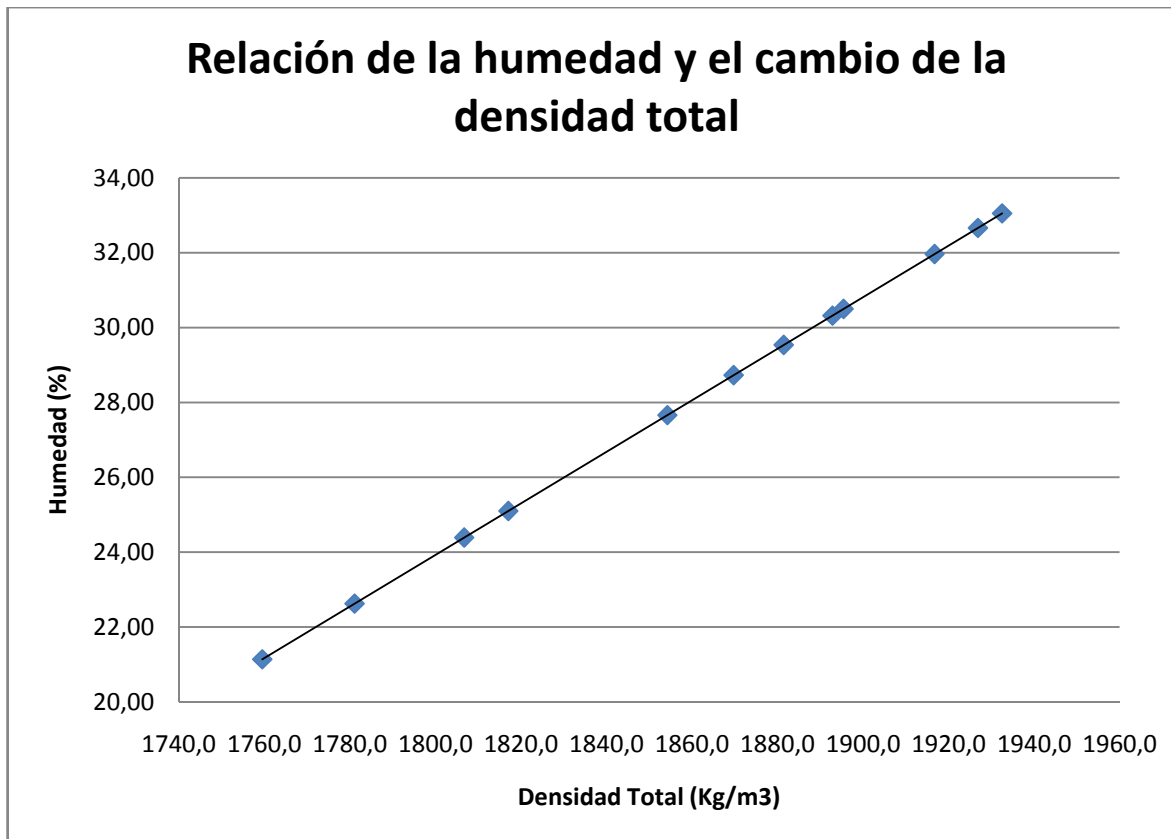


Figura 37R. Variación de la densidad total según la humedad para cada mes del año, en la estación 3+900.

## Diseño de pavimento

### Método de AASHTO 1993

Se va a determinar para cada estación el espesor de la estructura de pavimento, utilizando el

método convencional usado por el Departamento de pavimento del MOPT. Se definieron los parámetros iniciales, el número ESAL's, las variables de la base y la sub-base se adjuntan en anexos, y luego se calculó por medio iterativo por medio de Excel 2007 ®, la estructura.

### CUADRO 46R. NÚMERO DE ESAL's PARA EL CAMINO 3-01-033

Pt= 2

SN= 4

P diseño= 12 años

TPDA 2671

Tipo de Vehículo	TPDA		Factor de Crecimiento		Tránsito de diseño	Factor Camión (TF)	ESAL's de diseño
	% de Vehículos	Cantidad de Vehículos	Tasa de crecimiento (%)	Factor			
C-2+	85,66	2.288	4	15,03	12.551.736	0,000768	9.644
C-2	4,33	116	4	15,03	634.474	2,468710	1.566.332
C-3	7,71	206	4	15,03	1.129.744	1,579100	1.783.979
C-4	1,76	47	4	15,03	257.892	0,846790	218.381
T3-S2	0,54	14	4	15,03	79.126	2,677323	211.846
<b>Totales</b>	<b>100</b>	<b>2671</b>					<b>3.790.182</b>
Factor de carril=			0,5				
Factor de dirección=			1				
ESAL's por carril de diseño=			1.895.091				

El valor usado del tránsito promedio diario (TPDA), es tomado de la tesis "Diseño geométrico, drenajes y pavimento de la Ruta

Cantonal 3-01-033" de Efrain Zeledón (2010), ya que este lo desarrollo en el mismo camino en estudio.

<b>CUADRO 47R. PARÁMETROS INICIALES DE DISEÑO</b>			
	Sub-base	Base	Carpeta asfáltica
CBR (%)	57	95	-
Modulo (psi)	18024	29451	400000
Coefficiente de drenaje (m)	0,9	0,8	-
Coefficiente estructural (a)	0,14	0,13	0,42
W18	1.895.091		
R	65		
Zr	-0,388		
So	0,35		
$\Delta$ PSI	2,2		

<b>CUADRO 48R. ESPESORES DE PAVIMENTO PARA CADA ESTACIÓN</b>				
Estación		1+000		
CBR_Sub-rasante		4,52		
Capas	Asfáltica	Base	Sub-Base	Total
Espesores* (cm)	13	3	21	37
Espesores de Diseño (cm)	13	15	21	49
Estación		1+900		
CBR_Sub-rasante		10,92		
Espesores* (cm)	13	3	11	27
Espesores de Diseño (cm)	13	15	11	39
Estación		2+700		
CBR_Sub-rasante		4,44		
Espesores* (cm)	13	3	21	37
Espesores de Diseño (cm)	13	15	21	49
Estación		3+900		
CBR_Sub-rasante		1,98		
Espesores* (cm)	13	3	44	60
Espesores de Diseño (cm)	13	15	44	72

El valor de CBR usado para cada sub-rasante, proviene de las pruebas ASTM D1883-07 y AASHTO T193-99, para una conformación de la sub-rasante del 95% de proctor estándar. En el cuadro 48R el asterisco hace referencia a los

espesores del pavimento sin tomar en cuenta el espesor mínimo sugerido por el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimento, dependiente del número de ESAL's.

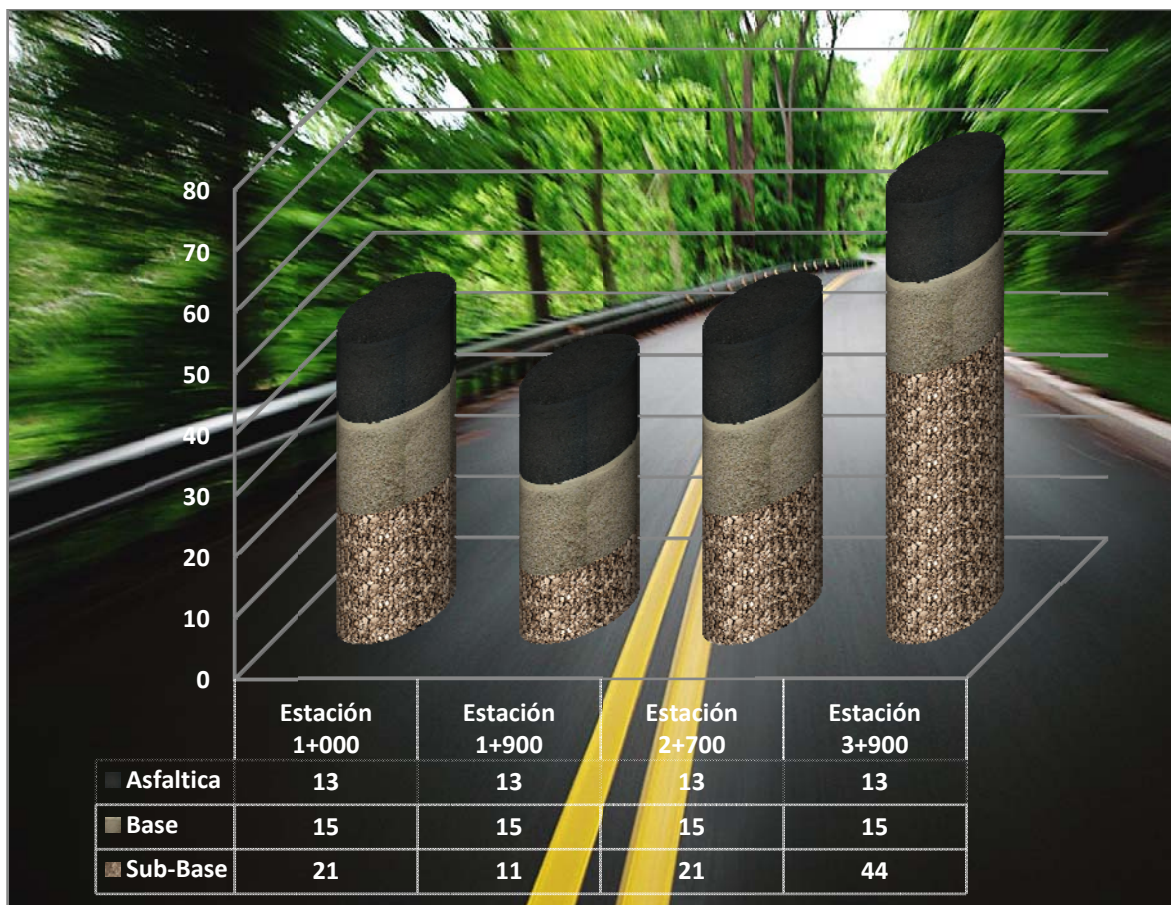


Figura 38R. Espesores de la estructura de pavimentos tomando en cuenta los espesores mínimos dados por MCDP, para cada estación, en centímetros.

## Diseño probabilístico del pavimento

Con la utilización del método de Rosenblueth (1975), se diseña el pavimento para las siete regiones definidas, agrupadas por estación como sigue, las regiones uno y dos, están dentro de la estación 1+000, región tres y cuatro, dentro de la estación 1+900, región cinco, dentro de la estación 2+700 y las regiones seis y siete, dentro de la estación 3+900.

Los parámetros iniciales de diseño son los definidos por el cuadro 47R. En el método se van a definir dos variables, la humedad debido a

la precipitación, del escenario lluvioso, dados por los cuadros de 39R hasta 45R y la densidad de las figuras 34R hasta 37R. Para cada región se determina la combinación de probabilidades, para cada una de ellas el CBR asociado, tomado de las figuras 25R hasta 28R.

Definidas estas variables se procede al diseño de espesores. El valor el cual se le aplica el análisis estadístico va hacer al espesor total de la estructura, la relación de variables va tomar un valor de 0,75. Seguidamente se va a determinar el índice de confianza y las probabilidades de falla para el espesor del pavimento debido al diseño convencional con la aplicación de espesores mínimos.

**CUADRO 49R. VARIABLES DEFINIDAS, EL PROMEDIO Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA CADA REGIÓN.**

		Promedio ( $\mu$ )	Ds Estándar ( $\sigma$ )	Promedio ( $\mu$ )	Ds Estándar ( $\sigma$ )
Estación 1+000		Región 1		Región 2	
	w%	25,79	4,09	26,17	3,86
	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1515,23	49,27	1519,83	46,51
Estación 1+900		Región 3		Región 4	
	w%	26,17	3,86	27,79	1,64
	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1506,41	46,10	1525,79	19,56
Estación 2+700		Región 5			
	w%	27,51	1,97		
	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1529,87	23,60		
Estación 3+900		Región 6		Región 7	
	w%	28,14	3,99	28,45	4,66
	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1861,20	57,90	1865,68	67,73



**CUADRO 50R. COMBINACIONES DE  
PROBABILIDADES PARA CADA REGIÓN**

		w%	$\gamma$ Kg/m <sup>3</sup>	CBR a 0,1
Región 1	g(++)	29,88	1564,50	8,51
	g(+/-)	29,88	1465,95	13,83
	g(-/+)	21,70	1564,50	43,17
	g(--)	21,70	1465,95	29,87
Región 2	g(++)	30,03	1566,34	8,29
	g(+/-)	30,03	1473,32	13,11
	g(-/+)	22,31	1566,34	41,04
	g(--)	22,31	1473,32	27,44
Región 3	g(++)	30,03	1552,51	12,13
	g(+/-)	30,03	1460,31	33,98
	g(-/+)	22,31	1552,51	25,06
	g(--)	22,31	1460,31	21,37
Región 4	g(++)	29,43	1545,36	12,8
	g(+/-)	29,43	1506,23	13,61
	g(-/+)	26,15	1545,36	19,47
	g(--)	26,15	1506,23	16,68
Región 5	g(++)	29,48	1553,47	8,79
	g(+/-)	29,48	1506,26	8,69
	g(-/+)	25,54	1553,47	12,97
	g(--)	25,54	1506,26	12,39
Región 6	g(++)	32,12	1919,10	3,95
	g(+/-)	32,12	1803,30	3,46
	g(-/+)	24,15	1919,10	15,14
	g(--)	24,15	1803,30	5,45
Región 7	g(++)	33,11	1933,41	3,95
	g(+/-)	33,11	1797,95	3,3
	g(-/+)	23,78	1933,41	16,9
	g(--)	23,78	1797,95	5,83

**CUADRO 51R. ESPESORES TOTALES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO EN CENTÍMETROS PARA CADA UNA DE LAS COMBINACIONES DE PROBABILIDAD**

	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5	Región 6	Región 7
S++	22	22	27	27	22	39	39
S+-	24	24	16	24	22	44	44
S-+	16	16	16	19	24	22	22
S--	16	16	19	22	24	32	29

**CUADRO 52R. ÍNDICE DE CONFIANZA Y PROBABILIDAD DE FALLA PARA LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DISEÑADA DE FORMA CONVENCIONAL**

Estación	Región	S*	Índice de confiabilidad ( $\beta$ )	Desempeño	Probabilidad de Falla
1+000	1	49	5,8	Alto	2,87E-07
	2		5,8	Alto	2,87E-07
1+900	3	39	3,0	Superior al promedio	0,00135
	4		4,4	Bueno	3,17E-05
2+700	5	49	17,4	Alto	2,87E-07
3+900	6	72	5,0	Alto	2,87E-07
	7		4,3	Bueno	3,17E-05

En el cuadro 52R, S representa el espesor del pavimento diseñado para cada estación de forma convencional, como lo indica el diseño del pavimento por AASHTO 1993.

Se van a tomar los datos de espesores de las capas del pavimento del cuadro 47R, que

se les determinará la proporción con respecto al espesor total de la estructura del pavimento, y esta proporción se le aplicará a los espesores originados por el método probabilístico (cuadro 51R), y calcular el número estructural para cada capa debido a los nuevos espesores.

**CUADRO 53R. COMPARACIÓN DE LOS ESPESORES TOTALES DEL PAVIMENTO CON LOS MÍNIMOS RECOMENDADOS DE MANUAL CENTROAMERICANO DE DISEÑO DE PAVIMENTO.**

Estación	Región	Espesor Analítico (cm)	Espesor Teórico (cm)	Diferencia	% Diferencia con respecto al ET
1+000	1	36	49	13	26,5
	2				
1+900	3	39	39	0	0,0
	4				
2+700	5	36	49	13	26,5
3+900	6	56	72	16	22,2
	7				

Nota:

\*Espesor Analítico: Debido al diseño probabilístico.

\*\*Espesor Teórico (ET): Debido al diseño convencional.

**CUADRO 54R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN UNO**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	8,66	9,45	6,30	6,30
Asfáltica	26,5	2,30	2,50	1,67	1,67
Base	30,6	2,65	2,89	1,93	1,93
Sub-base	42,9	3,72	4,05	2,70	2,70
SN		2,39	2,48	1,86	2,05
		SN calculado para cada caso			
Base		0,96	1,05	0,70	0,70
Sub-base		1,29	1,41	0,94	0,94
Total		2,63	2,87	1,91	1,91

**CUADRO 55R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN DOS**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	8,66	9,45	6,30	6,30
Asfáltica	26,5	2,30	2,50	1,67	1,67
Base	30,6	2,65	2,89	1,93	1,93
Sub-base	42,9	3,72	4,05	2,70	2,70
SN		2,42	2,51	1,89	2,09
		SN calculado para cada caso			
Base		0,96	1,05	0,70	0,70
Sub-base		1,29	1,41	0,94	0,94
Total		2,63	2,87	1,91	1,91

**CUADRO 56R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN TRES**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	10,63	6,30	6,30	7,48
Asfáltica	33,3	3,54	2,10	2,10	2,49
Base	38,5	4,09	2,43	2,43	2,88
Sub-base	28,2	3,00	1,78	1,78	2,11
SN		2,56	1,98	2,14	2,23
		SN calculado para cada caso			
Base		1,49	0,88	0,88	1,05
Sub-base		2,00	1,18	1,18	1,40
Total		3,78	2,24	2,24	2,66

**CUADRO 57R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN CUATRO**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	10,63	9,45	7,48	8,66
Asfáltica	33,3	3,54	3,15	2,49	2,88
Base	38,5	4,09	3,64	2,88	3,33
Sub-base	28,2	3,00	2,66	2,11	2,44
SN		2,53	2,49	2,28	2,37
		SN calculado para cada caso			
Base		1,49	1,32	1,05	1,21
Sub-base		2,00	1,77	1,40	1,63
Total		3,78	3,36	2,66	3,08

**CUADRO 58R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN CINCO**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	8,66	8,66	9,45	9,45
Asfáltica	26,5	2,30	2,30	2,50	2,50
Base	30,6	2,65	2,65	2,89	2,89
Sub-base	42,9	3,72	3,72	4,05	4,05
SN		2,37	2,38	2,52	2,55
		SN calculado para cada caso			
Base		0,96	0,96	1,05	1,05
Sub-base		1,29	1,29	1,41	1,41
Total		2,63	2,63	2,87	2,87

**CUADRO 59R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN SEIS**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	15,35	17,32	8,66	12,60
Asfáltica	18,1	2,78	3,14	1,57	2,28
Base	20,8	3,19	3,60	1,80	2,62
Sub-base	61,1	9,38	10,58	5,29	7,70
SN		3,12	3,26	2,43	2,8
		SN calculado para cada caso			
Base		1,17	1,32	0,66	0,96
Sub-base		1,56	1,76	0,88	1,28
Total		3,67	4,15	2,07	3,02

**CUADRO 60R. NÚMERO ESTRUCTURAL DEBIDO AL APLICAR PROPORCIÓN DE CAPAS PARA CADA COMBINACIÓN PROBABILÍSTICA, REGIÓN SIETE**

	Proporción (%)	Combinaciones de probabilidad			
		1 (in)	2 (in)	3 (in)	4 (in)
Total	100	15,35	17,32	8,66	11,42
Asfáltica	18,1	2,78	3,14	1,57	2,07
Base	20,8	3,19	3,60	1,80	2,37
Sub-base	61,1	9,38	10,58	5,29	6,98
SN		3,12	3,31	2,36	2,73
		SN calculado para cada caso			
Base		1,17	1,32	0,66	0,87
Sub-base		1,56	1,76	0,88	1,16
Total		3,67	4,15	2,07	2,73

En los cuadros anteriores el valor de SN, representa el número estructural debido a la sub-rasante, donde este varía de acuerdo con las

condiciones para cada combinación de probabilidades para cada región.

## Error de CBR de campo

Ya obtenidos los valores de CBR de campo (cuadros del 31R y 34R), se va a determinar el error relativo con respecto a los valores que se generan en las figuras de la 25R a la 28R, según como corresponda.

**CUADRO 61R. PORCENTAJE DE ERROR EN EL VALOR DE CBR OBTENIDO EN GRÁFICAS CON EL OBTENIDO EN CAMPO PARA LA MISMA DENSIDAD Y SATURACIÓN, PARA LA ESTACIÓN 3+900.**

N°Prueba	$\gamma_{seco}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	S (%)	CBR a 0,1"		Error (%)
			Campo	Gráfica	
1	1537,4	95,2	12,68	14,01	9,5
2	1533,1	96,5	10,02	13,13	23,7
3	1528,2	97,3	11,60	12,28	5,5

**CUADRO 62R. PORCENTAJE DE ERROR EN EL VALOR DE CBR OBTENIDO EN GRÁFICAS CON EL OBTENIDO EN CAMPO PARA LA MISMA DENSIDAD Y SATURACIÓN, PARA LA ESTACIÓN 2+700.**

N°Prueba	Densidad Seca (Kg/m <sup>3</sup> )	S (%)	CBR a 0,1"		Error (%)
			Campo	Gráfica	
1	1282,4	91,0	4,56	6,77	32,7
2	1301,9	96,9	5,91	7,62	22,5
3	1310,5	95,8	5,89	8,34	29,4

**CUADRO 63R. PORCENTAJE DE ERROR EN EL VALOR DE CBR OBTENIDO EN GRÁFICAS CON EL OBTENIDO EN CAMPO PARA LA MISMA DENSIDAD Y SATURACIÓN, PARA LA ESTACIÓN 1+900.**

N°Prueba	Densidad Seca (Kg/m3)	S (%)	CBR a 0,1"		Error (%)
			Campo	Gráfica	
1	1287,9	98,3	18,45	7,98	-131,2
2	1288,4	98,2	12,58	8,03	-56,7
3	1291,8	97,8	8,35	8,36	0,2

**CUADRO 64R. PORCENTAJE DE ERROR EN EL VALOR DE CBR OBTENIDO EN GRÁFICAS CON EL OBTENIDO EN CAMPO PARA LA MISMA DENSIDAD Y SATURACIÓN, PARA LA ESTACIÓN 1+000.**

N°Prueba	Densidad Seca (Kg/m3)	S (%)	CBR a 0,1"		Error (%)
			Campo	Gráfica	
1	1232,1	78,2	14,04	9,66	-45,3
2	1222,0	79,5	14,11	6,91	-104,2
3	1288,0	70,5	7,08	24,06	70,6

## Rendimientos y productividad

Se determinan los rendimientos de siete actividades, las cuales seis de ellas son necesarias para determinar el CBR de laboratorio, estas son, el muestreo de campo,

y preparación del material, límites de Atterberg, granulometría, proctor y CBR de laboratorio, compuesto en dos fases preparación y sumergido de moldes y el fallo de ellos. La séptima actividad se refiere a la prueba de CBR de campo. El rendimiento se determinó con lo expuesto por Ortiz y Paniagua (2006). También a estas actividades se le determina la productividad por medio del método de Work Sampling.



### CUADRO 65R. RENDIMIENTO DEL MUESTREO DE CAMPO.

Trabajadores:		2	Técnicos		Jornada		5	Horas		
Volumen Trab:		8	Sacos							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo							Trasladarse	Otros
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos				
1	1,58				0,0167	0,0830	3,1533	0,1670		
2	1,88	0,3300			0,0500		2,5400	0,2000		
3	1,55	0,2500	0,0167		0,0167	0,1167	3,0169	0,0330		
4	2,13	0,2500		0,5000	0,0670	0,1167	1,8533	0,0830		
	Promedios	0,277	0,017	0,500	0,038	0,105	2,641	0,121		
								Total	3,698	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Saco)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/saco)				
1	0,395	0,446	0,059	0,133	284,042	1,714				
2	0,470									
3	0,388									
4	0,533									

### CUADRO 66R. RENDIMIENTO DE LA PREPARACIÓN DEL MATERIAL.

Trabajadores:		2	Técnicos		Jornada		8	Horas		
Volumen Trab:		4	Cajones							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo							Conversación	Otros
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos				
1	5,2	0,2500	0,1800	1,0000		0,4200		0,9500		
2	4,8	0,3000	0,2200	1,2000	0,1000	0,4000	0,6400	0,3400		
	Promedios	0,275	0,200	1,100	0,100	0,410	0,640	0,645		
								Total	3,370	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Cajón)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/cajón)				
1	2,600	2,500	0,100	0,040	72,786	4,320				
2	2,400									

### CUADRO 67R. RENDIMIENTO DE LÍMITES DE ATTEMBERG.

Trabajadores:		1	Técnicos		Jornada		8	Horas		
Volumen Trab:		8	Pruebas							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo								
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos	Trasladarse	Otros		
1	5,33	0,3300	0,2800	1,1600		0,4400	0,1900	0,2600		
2	6,64	0,2500	0,1100	1,0000						
3	6	0,3000	0,1000	1,0500	0,1500	0,1800	0,2200			
	Promedios	0,293	0,163	1,070	0,150	0,310	0,205	0,260		
								Total	2,452	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Pruebas)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/Prueba)				
1	0,666	0,749	0,067	0,089	44,187	1,080				
2	0,830									
3	0,750									

### CUADRO 68R. RENDIMIENTO DE GRANULOMETRÍA.

Trabajadores:		1	Técnicos		Jornada		8	Horas		
Volumen Trab:		10	Pruebas							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo								
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos	Conversación	Otros		
1	4,2	0,1800	0,2300	1,0000	0,1500	0,5400	0,3600	0,3400		
2	5,83	0,3000		1,1200	0,1800	0,4000		0,1700		
	Promedios	0,240	0,230	1,060	0,165	0,470	0,360	0,255		
								Total	2,780	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Prueba)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/Prueba)				
1	0,420	0,502	0,081	0,163	53,257	0,769				
2	0,583									

CUADRO 69R. RENDIMIENTO DE LA PRUEBA DE PROCTOR.										
Trabajadores:		1	Técnicos		Jornada		8	Horas		
Volumen Trab:		4	Pruebas							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo							Instrucciones	Otros
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos				
1	6	0,2500	0,1667	1,0000		0,4200		0,1667		
2	4	0,4200	0,3333	1,0000	0,3333	0,5833	0,6667	0,6667		
3	4,8	0,2500	0,1700	1,2000	0,4200	0,1600		1,0000		
	Promedios	0,307	0,223	1,067	0,377	0,388	0,667	0,611		
								Total	3,639	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Prueba)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/prueba)				
1	1,500	1,233	0,205	0,167	83,441	2,262				
2	1,000									
3	1,200									

CUADRO 70R. RENDIMIENTO DE LA PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA LA PRUEBA DE CBR DE LABORATORIO.										
Trabajadores:		1	Técnicos		Jornada		8	Horas		
Volumen Trab:		5	Pruebas							
Observaciones	Tiempos (hr)									
	Trabajo	No productivo							Hablar	Otros
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos				
1	5	0,2500	0,0500	1,1500		0,5500		1,0000		
2	4	0,3500	0,2500	1,3300	0,0700	0,5000	0,4200	1,0800		
3	4,6	0,3300	0,1500	1,1200	0,2000	0,2100	0,4900	0,9000		
	Promedios	0,310	0,150	1,200	0,135	0,420	0,455	0,993		
								Total	3,663	
Observaciones	R (Horas-Hombre/Prueba)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/Prueba)				
1	1,000	0,907	0,082	0,091	84,473	1,673				
2	0,800									
3	0,920									

CUADRO 71R. RENDIMIENTO DEL FALLO DE PROBETAS EN CBR.									
Trabajadores:		1	Técnicos		Jornada		8	Horas	
Volumen Trab:		14	Moldes						
Observaciones	Tiempos (hr)								
	Trabajo	No productivo							
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos	Hablar	Otros	
1	4,62	0,1700	0,2000	1,1500	0,2500	0,8500	0,3800	0,3800	
2	5,88	0,1600	0,1800	1,2300		0,3600		0,1900	
	Promedios	0,165	0,190	1,190	0,250	0,605	0,380	0,285	
								Total	3,065
Observaciones	R (Horas-Hombre/Molde)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/Molde)			
1	0,924	1,050	0,126	0,120	62,107	1,702			
2	1,176								

CUADRO 72R. RENDIMIENTO DE LA PRUEBA DE CBR DE CAMPO.									
Trabajadores:		2	Técnicos		Jornada		8	Horas	
Volumen Trab:		3	Pruebas						
Observaciones	Tiempos (hr)								
	Trabajo	No productivo							
		café	S.S	Almuerzo	Fumar	Descansos	Trasladarse	Otros	
1	2,96	0,5000			0,0500	0,1667	0,5000	0,3333	
2	1,81				0,0333	0,1667	0,3500	0,3000	
	Promedios	0,500	0,000	0,000	0,042	0,167	0,425	0,317	
								Total	1,450
Observaciones	R (Horas-Hombre/Saco)	R <sub>promedio</sub>	$\sigma$	C.V.	fi (%)	R <sub>final</sub> (Hr-Hombre/prueba)			
1	1,973	1,590	0,383	0,241	22,137	1,942			
2	1,207								

**CUADRO 73R. PORCENTAJE DE PRODUCTIVIDAD DETERMINADO POR EL  
WORK SAMPLING**

Actividad	Muestreo de Campo	Preparación del material	Límites de Atterberg	Granulometría	Proctor Estándar	CBR de laboratorio		CBR en campo
						Preparación	Fallo	
N° Muestras	214	363	290	360	364	366	350	327
Trabajando	106	227	218	226	224	220	232	134
No Trabajando	108	136	72	134	140	146	118	193
Productividad (%)	49,53	62,53	75,17	62,78	61,54	60,11	66,29	40,98

# Análisis de resultados

En este estudio se realizó la evaluación de la sub-rasante, en una carretera de ruta cantonal en la provincia de Cartago, cómo ésta se comporta a las diferentes humedades que pueden estar expuestas debido a las condiciones de precipitación de la zona y se determinó cómo la humedad afecta el diseño de la estructura de pavimento.

Se tiene que para las cuatro estaciones los límites líquidos son superiores al 50% (Cuadro R1), lo que determina que el suelo tiene gran capacidad de absorción y retención de humedad, antes de comportarse como un fluido. Esta propiedad se debe tener presente, ya que determina la capacidad de retención de humedad en las condiciones naturales o de campo en las que se encuentran. También se espera que la relación de humedad y densidad sea de un solo pico, según Braja Das mencionado por Korte (2009) este comportamiento es típico de materiales con límites líquidos entre 30% y 70%.

Se pueden verificar los límites de consistencia, comparándolos con los valores típicos según el tipo de suelo, Costet mencionado por Korte (2009), define para un suelo limoso su límite líquido entre rangos de 20% y 60%, con el índice plástico entre 5% y 25%. Verificando estos valores el suelo caracterizado para la estación 1+000, 1+900 y 2+700 cumple entre estos parámetros. El valor del LL de la estación 1+900 es superior por tres puntos del valor límite que da Costet, otros autores como Braja Das (1999) hacen referencias a valores típicos de límites como la caolinita, illita con valores de hasta 100% para LL. Se pueden hacer más estudios para determinar la cantidad de estos materiales presentes en el suelo, los que pueden dar valores altos del LL. Para el suelo de la estación 3+900 está entre los rangos de un suelo arcilloso con límites líquidos mayores a 35% y un índice plástico mayor que 15%.

Al revisar los límites de Atterberg se puede caracterizar la sub-rasante de la carretera y saber el comportamiento que ésta pueda

presentar, según Moncayo (1987) para este tipo de suelo la capacidad de soporte es pobre, según el Ing. Chávez (2010) cuando se está en presencia de límites líquidos superiores a 50 por ciento es recomendable manejar las posibilidades de estabilizar o sustituir si son tramos pequeños. Este criterio debe ir con el análisis del valor del CBR.

La prueba proctor se realizó para determinar de cinco a seis puntos de humedades diferentes. Como era de esperar la prueba toma la curva típica, con una concavidad hacia abajo de un solo pico, (figuras 1R y 4R). En el cuadro 4R se establece la relación de densidad máxima para la humedad óptima. Se observa que para el suelo arcilloso, la densidad seca es la mayor y a su vez de menor humedad óptima, para los suelos limosos las densidades secas y las humedades están bastante cercanas.

Esta prueba se toma como parámetro de control y diseño constructivo, por lo general el MOPT hace la indicación de la conformación de la sub-rasante al 95% del proctor estándar. Según Barrera et al. (2004) si la compactación en el sitio se hace por el lado seco, el suelo tiene más posibilidades de colapso que hacer la compactación por el lado húmedo, esto también va depender de la energía de compactación, con una mayor energía se obtienen suelos mas ordenados en su microestructura y estables, si se lleva un mayor control en este aspecto se puede orientar a como se quiere que falle la sub-rasante, como ya se mencionó en el marco conceptual las fallas típicas debidas a la sub-rasante son estructurales.

Al realizar la prueba de CBR a diferentes densidades se observó que, entre mayor sea la densidad seca se va obtener un valor mayor de CBR. Prueba de que se puede mejorar la capacidad de soporte de las sub-rasantes, al aumentar la energía de compactación. (Ver figuras 5R, 6R, 7R y 8R). El comportamiento que se da en la estación 3+900, es que la tendencia de las curvas (ver figura 5R), para 0,1" y 0,2", es

una relación cuadrática pero con una concavidad hacia abajo no cumpliendo el supuesto. En esta prueba se observa en el cuadro 5R, en la probeta conformada por 56 golpes el valor de CBR a 0,1", es ligeramente menor al valor del CBR a 25 golpes, no es mucha la diferencia, pero no está cumpliendo con la tendencia observada para las demás pruebas. La posibilidad de que no tenga el mismo comportamiento se debe a que no se le aplique inicialmente la misma energía de penetración del pistón antes de realizar la prueba, esto puede bajar los valores para 0,1" o 0,2", cuando se calcula el CBR.

Se debe tener en cuenta que el esfuerzo dado por la máquina de CBR, al ser aplicado a la probeta no va empezar en cero, por lo que se recomienda aplicar energía y tomar lecturas de la deformación, por lo que se debe tener cuidado y aplicar la misma energía a todas las probetas. Este pequeño descuido puede alterar los datos de forma muy sutil.

En este estudio se determinó la influencia de la precipitación en la carretera. El humedecimiento y el secado que se da normalmente, en los tiempos lluviosos o secos, repercute en la succión del suelo, esta varía por la humedad presente, la cual está totalmente relacionada con la saturación del suelo. En mecánica de suelos, como ya se vio, la caracterización del suelo al 100% de saturación, está bien caracterizada, contrario para los no saturados. Se busca establecer las repercusiones de un modelo de suelo no saturado en la dimensión de la estructura del pavimento.

Para ver el efecto de la saturación en el valor de CBR, se tienen que realizar pruebas controladas, determinar la relación de vacíos del suelo y la humedad a que se deben preparar las probetas para alcanzar una saturación a una densidad determinada. Para esto se utilizó el procedimiento de R. S. Ladd (1978) de conformación de probetas por medio de la subcompactación, en molde de CBR que luego se falla en máquina de CBR. Para cada estación se realizaron curvas de saturación contra CBR a diferentes densidades una al 95% del proctor y la otra a la densidad encontrada en sitio.

Se necesita determinar para cada probeta que se conforma, el grado de subcompactación, el espesor de cada capa y peso del material húmedo de cada una de las ellas. Uno de los criterios que da Ladd, para definir el número de capas, es la densidad a la que se

quieran conformar las probetas, debido que si es muy densa la energía que se debe aplicar tiene que ser mayor; lo que se recomienda hacer muchas capas, caso contrario para la conformación de probetas de densidades bajas que el número puede ser menor, pero no menos de cuatro capas.

Como se definió ya a que densidades se va a evaluar el suelo, se calcula la relación de vacíos a esa densidad, y con un proceso interactivo, se determina la humedad del suelo, para la saturación deseada, el número de capas se definió de forma arbitraria, de forma a prueba y error. En general para las probetas con densidades del 95% del Proctor se usaron ocho capas, y para densidades en sitio se utilizaron once capas.

Parte importante que se debe revisar cuando se realiza la conformación, es la cantidad de agua que se le debe añadir al suelo, ya que el material traído del campo aunque se seque mantiene humedad del medio ambiente por lo que se debe corregir la cantidad de agua que se le debe de echar para llegar a la condición deseada, en la conformación de las probetas. Lo que se hizo es tomar una muestra de al menos 100g y se puso a secar por un lapso de una hora en la balanza de humedades, y con este valor se corrige la humedad que se le debe añadir de más para llegar a la deseada de conformación. Aplicando ese procedimiento, dio resultados satisfactorios, ya que las aproximaciones al valor que se estimaron coincidían con lo esperado. Es de considerar que el suelo trabajado tenía una absorción de humedad del medio entre rangos de 5% a 12% de la humedad, por lo que no es nada despreciable, lo que puede producir errores. El efecto de esta corrección se puede ver en las aproximaciones hechas para cada estación en los siguientes cuadros 9R, 10R, 15R, 16R, 21R, 22R, 27R y 28R.

Conformadas las probetas se fallan para determinar el valor de CBR a 0,1" y a 0,2" de penetración, para cada densidad se determinaron cuatro valores a diferente saturación, y los resultados fueron satisfactorios, cumplen con la tendencia esperada a mayor saturación el CBR tiende a cero, comprobando los resultados encontrados en la literatura. Cuando el suelo no saturado se le añade agua, este pierde succión, el esfuerzo de succión del suelo disminuye su resistencia cuando este se satura, lo que coincide con los resultados. Un suelo no saturado cuando

se llega a humedecer dependiendo de su microestructura colapsa o se expande.

El valor de CBR varía dependiendo de la saturación y la densidad seca. Se pudo observar este comportamiento con las pruebas de CBR al conformar probetas con diferentes energías, esto referido a que se usaron 10, 25, 50 golpes, al igual que haciendo uso de la sub-compactación para diferentes saturaciones. Al combinar las dos pruebas, que caracterizan la tendencia del CBR, se genera una gráfica que relaciona las tres variables mencionadas. Por medio de la herramienta de AutoCad 2009®, se genera el gráfico de tres dimensiones, superponiendo la forma de las figuras dadas, para cada estación, como se muestra en las figuras 25R, 26R, 27R y 28R, proyectándolas, así se forma una superficie en la cual se puede calcular el CBR, para cualquier densidad y saturación entre los límites vistos en las graficas, las superficies se generaron a partir de los valores de CBR a 0,1" de penetración.

Con la creación de estas graficas podemos establecer una relación con respecto a la variación del valor de CBR, se tiene que este va ser máximo cuando la saturación tienda a cero y la densidad seca sea mayor, el valor de CBR mínimo se obtiene cuando la saturación esté muy cerca al 100% y la densidad seca sea menor.

Parte importante de esta investigación, es lograr relacionar en un gráfico, la saturación del suelo, la densidad seca y el valor de CBR, para determinar las dimensiones del pavimento, ya que se puede utilizar para diseñar acorde con las necesidades que se presentan en diferentes lugares según las condiciones predominantes del clima, ya que en las nuevas metodologías de diseño como el mecanístico, es parte importante en el proceso del diseño. Como se va ver más adelante las implicaciones del clima afectan las dimensiones de la estructura del pavimento, producto de la saturación del suelo.

Con ayuda de las graficas se pudo establecer otra relación con respecto al valor de CBR que se saca en laboratorio, el cual trata de reproducir las peores condiciones del suelo, al sumergir las probetas por cuatro días. Por medio de las ecuaciones que correlacionan los datos de la densidad y CBR, con las ecuaciones que relacionan saturación y CBR, a una determinada densidad, se logra definir en qué porcentaje de saturación se da el valor de CBR de diseño, calculado en laboratorio, para cada estación. Se

tiene que para la estación 3+900 el valor de CBR está muy cerca del 100% de saturación, en la estación 2+700 el valor de CBR de diseño se encuentra al 78,7% de saturación, para la estación 1+900 el valor de CBR que se reporta para diseño se encuentra con una saturación del 70% y la estación 1+000 el valor de CBR se encuentra a una saturación del 86,6%. Por lo que la suposición de tener un valor crítico de CBR para diseño no siempre es correcta para este caso en particular.

Tomando en consideración lo anterior, se debe verificar qué sucede con el suelo en las condiciones climáticas propias del sitio en estudio, propiamente la influencia de la precipitación en la variación de la humedad. Lo que se hizo fue determinar la cantidad de lluvia que cae en el camino 3-01-033, por lo que se pidieron datos meteorológicos de temperatura y mm de agua caída, al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), de estaciones cercanas a la carretera, estas son la estación Tecnológico, Paraíso, Navarro y Dulce Nombre, las cuales se encuentran en funcionamiento por lo que los datos suministrados son confiables.

Se necesita hacer un pronóstico de los datos de precipitación para hacer el análisis, el método que se adoptó fue el expuesto por Villalobos y Retana (1997), el cual hace una agrupación de los datos y los define por medio de estaciones los datos; de esta forma, en estación seca, estación normal y estación lluviosa, pero para que los resultados sean confiables se debe contar por lo menos con datos de 30 años como mínimo.

Para efectos del análisis se va tomar la agrupación de más incidencia de precipitación, esta es la estación lluviosa. Se debe tener presente que el método no toma en cuenta los fenómenos ENOS, que pueden variar de forma abrupta la condiciones del clima, también este método es utilizado para las producciones agrícolas, con lo que se caracteriza el año deseado según el escenario que más se ajusta y de esta forma tomar las medidas pertinentes.

El modelo que se aplica para determinar la humedad para cada mes, es el propuesto por Schosinsky (1999), de balance hídrico. Este cuenta con algunas limitantes; este modelo es desarrollado para campo abierto, entiéndase que son lugares donde las construcciones son mínimas o inexistentes, por lo que se debe tomar en cuenta si hay estructuras cercanas o el caso



de un paso de una carretera. Los parámetros que utiliza Schosinsky (1999) en el suelo son específicos de la investigación de él, posiblemente no caracterizan de la mejor forma los demás suelos, tal es el caso de la capacidad de campo parámetro que afecta de gran forma el cálculo de la humedad, ya que esta es la frontera superior de la cantidad, que recibe el suelo, aunque la precipitación sea mucho mayor.

El parámetro de capacidad de campo (CC) que utiliza Schosinsky (1999), es un límite frontera el cual determina la humedad máxima que el suelo se expone en el modelo, que se está analizando, como se expuso anteriormente el suelo tiene capacidad de absorción superior al 50% y el factor de CC es menor por lo que puede ser una limitante en la investigación.

Se va analizar el diseño debido a los parámetros que se usan normalmente en el Departamento de Pavimentos, de la Subdirección de Geotecnia y Materiales del MOPT. El método para el diseño se va hacer por medio del método de la AASHTO 1993. Se tiene que determinar el número de ejes equivalentes, por ser una carretera cantonal el diseño se va hacer para 12 años, la carretera consta de dos carriles de direcciones opuestas, con esta información y con el tránsito diario promedio se establece la cantidad de ejes equivalentes según las proyecciones, ver cuadro 46R.

Los parámetros de diseño debidos a la base, sub-base y la carpeta asfáltica son tomados de los valores típicos que se usan en el MOPT (cuadro 47R), estos van a permanecer fijos para todos los diseños que se hagan. Definidas las variables se diseña cada estación según el CBR que se obtuvo en laboratorio, en el cuadro 48R, se encuentran los diseños de espesores de la estructura del pavimento, se dan dos valores los denominados como "espesores" y los "espesores de diseño", estos últimos son los espesores del pavimento tomando en cuenta que la estructura debe cumplir con espesores mínimos dados por el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos, y los llamados solo como "espesores" son dados solo por el resultado del diseño.

En los diseños se observa que el valor que varían es el espesor de la sub-base, debido a que esta soportada directamente a la sub-rasante, y de acuerdo con la calidad de esta la sub-base varía su espesor. Para la estación 3+900 se tiene que el valor de CBR de la sub-

rasante es el más bajo por lo que el espesor de la sub-base es el más alto (44cm), caso contrario lo que sucede para la estación 1+900 que el valor de CBR de la sub-rasante es el más alto por lo que el espesor de la sub-base es el más bajo con 11cm, esta variación del espesor del pavimento se aprecia mejor en la figura 38R. Los espesores de la carpeta, la base se mantienen igual, ya que la estructura inmediata anterior no está variando su número estructural, son fijos.

Como se analizó anteriormente estos espesores del pavimento son el resultado de un suelo que no se encuentran totalmente saturados, pero si estos los acercamos a un valor cercano al 100% de saturación las dimensiones del pavimento pueden ser mayores.

Para determinar el efecto de la saturación en el diseño de la estructura de pavimento, se procede a realizar un diseño probabilístico, que va a depender de dos variables, la densidad y la humedad, la cual se estimo con el modelo de Schosinsky. La densidad del suelo aunque se conforme al 95% del proctor, va a variar su densidad con la humedad, para cada una de las estaciones se determina de una forma analítica como la densidad total varía con la humedad (figuras 34R, 35R, 36R y 37R).

Con los datos de CBR probabilísticos se procede a determinar la estructura del pavimento, tomando los mismos parámetros de diseño anteriormente descritos, en el cuadro 51R se muestran los valores de espesor total de la estructura del pavimento, para cada región. Se debe indicar que los espesores dados por el diseño no están afectados por los espesores mínimos del MCDP. Se tiene para la estación 1+000 el espesor total del pavimento calculado por el método convencional sin tomar en cuenta los espesores mínimos que da MCDP, es de 37cm, con el método probabilístico el espesor del pavimento varía entre espesores de 16cm y 24cm para las regiones 1 y 2, en las mismas condiciones, no son afectados con los espesores mínimos. Se va a comparar las siguientes estaciones con los resultados del diseño probabilístico, el espesor del pavimento debido al diseño convencional se llamará "espesor teórico" y el espesor debido al diseño probabilístico se le llamará "espesor analítico".

Para la estación 1+900, el espesor teórico es de 27cm, el espesor analítico varía entre 16cm a 27cm que corresponde a las regiones 3 y 4, en la estación 2+700 el espesor

teórico es de 37cm, el espesor analítico varía entre 22cm a los 24cm en la región 5, en la última estación la 3+900 el espesor teórico es de 60cm, el valor del espesor analítico varía entre 22cm a 39cm. Se puede observar que los valores de los espesores teóricos se encuentran fuera o por el límite de los rangos de los espesores analíticos. Si dentro de la estación con más precipitación, la carretera, se puede construir con espesores de pavimento menores a los reportados por el diseño convencional, se encuentra que la carretera va estar sobrediseñada a la necesidad propia del lugar.

Cuando se determinó la probabilidad de falla para las estructuras diseñadas con el CBR dado de laboratorio, afectado por los espesores mínimos, con la finalidad de comparar con los datos probabilísticos la confiabilidad del diseño, en el cuadro 52R, se muestra que todos los diseños son confiables, la probabilidad de que falle por el efecto de saturación, producto de las condiciones intrínsecas del lugar, es mínimo.

Se puede decir que el efecto de la saturación no afecta en gran medida el diseño convencional de la estructura del pavimento, según como se determinó la combinación de probabilidades, para las condiciones de precipitación mensual. Cabe aclarar que esto es así, si se aplica el espesor mínimo permitido por el Manual Centroamericano de Diseño de Pavimento (MCDP), que al igual como no se le aplicará.

Hay que tener presente las limitaciones del modelo para la determinación de las humedades para cada mes, ya que como se había dicho este va tener una frontera la cual va a depender del factor de capacidad de campo, si se considera el límite líquido del material se observa que el suelo que se está estudiando puede tener un buen comportamiento en presencia de contenidos altos de humedad. La máxima humedad que va recibir el suelo en las regiones de uno a cinco es del 29%, y las regiones seis y siete del 35%, para el modelo de Schosinsky, aunque la cantidad de agua que cae en las regiones sean superiores.

Este efecto expuesto anteriormente se ve en las saturaciones calculadas según la humedad y densidad de las combinaciones de probabilidades, se tiene que para la estación 1+000 el rango de saturaciones para las diferentes densidades se encuentra entre un 51% y 68%, mientras que la saturación del valor de

CBR calculado de laboratorio es de 86,6%, en la estación 1+900 la saturación en las combinaciones de probabilidades varían entre 50% y 67%, mientras el valor del CBR del laboratorio es de 70% de saturación, esto mismo ocurre para la estación 2+700, dentro de las combinaciones probabilísticas la saturación se encuentra entre valores de saturación de 58% y 67%, en cambio la saturación alcanzada en el laboratorio es del 78,7%, en la última estación 3+900 los valores de la saturación debido a la combinación de probabilidades se encuentran entre el 80% y 100%, para el valor de laboratorio la saturación se encuentra muy cercano al 100%.

Se ha dicho, como es la tendencia del valor de CBR, como este cambia de acuerdo con su densidad y saturación, en lo observado, se puede decir que los diseños probabilísticos no consideran las saturaciones que se dieron al calcular los valores de CBR en el laboratorio. Se supone que dentro del modelo de Schosinsky en el cálculo de la humedad para cada mes, al relacionarlo con la saturación del suelo no alcanza más del 80% de saturación para una densidad del 95% del proctor el cual es el valor de densidad de diseño.

Se ve que para cada estación, menos para la estación 3+900, los valores de CBR de laboratorio tienen saturaciones superiores a los CBR originados por el método probabilístico, es decir que los espesores del pavimento calculados para el CBR de laboratorio son mayores, por lo que la confiabilidad de las estructuras comparadas, con las estructuras probables es alta.

En este caso la estructura de pavimento diseñada de forma estándar, sin tomar en cuenta el efecto de la saturación del suelo debido a las precipitaciones, se está sobre diseñando, por lo que se esté construyendo estructuras más caras de lo que realmente se ocupa. Ya que los índices de confiabilidad del modelo probabilístico son altos, lo que sugiere es la poca probabilidad de que la estructura falle por un efecto de saturación del suelo.

En el cuadro 51R se observan los espesores analíticos para cada región según las combinaciones de probabilidades sin ser afectados por el espesor mínimo que recomienda el MCDP para los volúmenes de tránsito, en la carretera en estudio se tiene que el valor de ESAL's de diseño se encuentra entre los 500 000 y 2 000 000, por lo que el espesor mínimo de

carpeta asfáltica es de 7,5cm, para la capa de base es de 15cm, según lo que se recomienda. Si estos dos valores se lo aplicamos al diseño probabilístico a los espesores mayores de cada región, como se muestra en el cuadro 53R, se observa que los espesores analíticos son menores a los espesores teóricos en magnitudes de 13cm y 16cm, también se observa el porcentaje que representa de los espesores teóricos estas diferencias que van del 22% al 26%. Es decir que si en el diseño del pavimento se toman en cuenta las condiciones climáticas se puede disminuir en su cuarta parte el espesor del diseño, para este caso en particular.

En el cuadro 53R, presenta dos situaciones, en la estación 1+900 los espesores tanto teórico como analítico coinciden, por lo que para estas características del suelo el clima no afecta el resultado del diseño convencional, en cambio, para las estaciones 1+000, 2+700 y 3+900, garantiza espesores menores de la estructura del pavimento, el MCDP enfatiza en la importancia del uso de los espesores mínimos, por la estabilidad de la estructura frente suelos expansivos, el cual no es el caso de la carretera que se está estudiando.

Se trató de presentar otras configuraciones de espesores en el cuadro 48R, los espesores de la carpeta asfáltica y de la base, son constantes para cualquier valor de CBR de sub-rasante, por lo que se decide tomar la proporción de la estructura de ese diseño y aplicárselo a los diseños probabilísticos para saber si variando los espesores de la carpeta, base y sub-base, estos cumplen con el valor de número estructural requerido, se presenta en los cuadros 54R al 59R. Así se simula el uso de otras calidades de carpeta asfáltica y base, para la cual la estructura cumple con los requerimientos mínimos del número estructural, también si es posible obtener estructuras más económicas y efectivas si se logra reducir los espesores de las capas más caras.

El valor del número estructural requerido ( $SN_{Req.}$ ), para la base es de 1,75 y para la sub-base es de 2,11, este valor para sub-rasante va a depender del CBR que se genere. Para región uno, una de las tres combinaciones cumple el SN para la sub-rasante pero no así para el resto de las capas, para la región dos, tres de una de las combinaciones cumplen con el SN para sub-rasante pero no así para las demás capas, la región tres los SN de la sub-rasante cumplen,

pero no así las capas base y sub-base, al igual que la región cuatro cumplen pero solo para el requerido de la sub-rasante, en la región cinco cumplen únicamente en el SN de la sub-rasante, para las regiones seis y siete, tres cumplen con el SN requerido para la sub-rasante, se deduce que si se aplica estas proporciones el espesor de las capas de base y sub-base, no van obtener el espesor adecuado.

Parte del estudio es realizar las pruebas de CBR de campo. En el departamento del MOPT es la primera vez que se hacen las pruebas, por lo que los técnicos encargados de realizar las pruebas no están bien entrenados. Los resultados se observan en los cuadros 31R a la 34R. Para cada estación se realizaron tres pruebas al suelo y se determinó la densidad en sitio de cada uno. El análisis de los resultados se va realizar en relación al error relativo que se da cuando se compara el valor de CBR que se lee para las mismas condiciones de campo con las graficas de las figuras 25R a la 28R. El error para casi todas las pruebas es superior al 10%, a excepciones de errores del 5,5% y uno de 0,2 de error lo que dan datos muy cercanos a los encontrados en las gráficas que relacionan las tres variables, saturación, densidad y CBR (figuras 25R a 28R).

Por ser la primera vez que se usa el equipo de CBR de campo, en la Sub-Dirección de Geotecnia y Materiales del MOPT, se hicieron algunas pruebas para observar y determinar las posibles fuentes de error en la ejecución de la prueba.

Primero se realizó la prueba sin el uso de las gatas hidráulicas, y con la vagoneta sin cargar, para ver si era posible obtener resultados confiables. Lo que se observó, en primera instancia, fue que no se logró hacer la perforación característica de esta prueba, debido a la penetración del pistón.

Antes de hacer el ensayo se mide un punto fijo de la vagoneta al suelo en plano de referencia que no se mueve, luego se volvió a medir, esta medida es mayor a la medida inicial. Es decir el camión sube, puede ser el chasis del camión debido a las hojas de suspensión, y el efecto que se considera en la norma española NLT-112/58, por la suspensión y la elasticidad del neumático del camión, el cual da resultados erróneos debido al giro que se le da a la gata mecánica, el cual produce vibración. Se debe garantizar un medio rígido.

Es de suma importancia que el operario que da los giros de la manivela, para bajar el pistón tenga una velocidad constante y que se acerque a la velocidad dada por norma. Se pudo comprobar que si la velocidad no es constante, empieza rápido y baja la velocidad, esto se traduce a saltos de la aguja del reloj del anillo de carga dando a veces retrocesos de hasta 50 unidades del reloj. Caso contrario si se inicia con una velocidad lenta y se incrementa, produce que en ese cambio de velocidad, la aguja del reloj del anillo de carga se adelante rápidamente. De las dos formas la prueba se debe invalidar y repetir será lo recomendable.

Se recomienda que cuando se hace la prueba, en el camión que se utilice no debe haber nadie moviendo el camión, ya que esto afecta la lectura de la deformación del anillo de carga, provocando vibraciones en el camión y éste al reloj del anillo.

En última instancia se logró determinar los rendimientos para las actividades necesarias para determinar el CBR de laboratorio, estas son las actividades de muestreo, preparación de material, límites de Atterberg, granulometría, proctor estándar y CBR tanto para la preparación y fallo de las probetas, se tabulan los resultados del cuadro 65R a la 71R, en cada uno se determina el volumen del trabajo, por horas hombre. En el cuadro 72R se determina el

rendimiento de la prueba de CBR de campo. Se consideran variables como el traslado al sitio en se va hacer la prueba, abrir una trinchera para llegar a la sub-rasante, colocado del equipo de CBR, realización de la prueba y la determinación de la densidad en sitio, definido por las condiciones en que se presentaron en este proyecto.

La productividad de estas mismas actividades se determinó con la metodología de Work Sampling, que consiste en hacer observaciones cada cierto tiempo de forma aleatoria, e identificar si se está haciendo trabajo productivo o no productivo, así que los resultados da, que la actividad más productiva son los límites de Atterberg y la menos productiva es el CBR de campo. Si se ve como una línea de producción es evidente que la duración para determinar el CBR de laboratorio, se van a necesitar 19,554 horas hombre, pero a esto se debe añadirle los días que las probetas se sumergen, los días que dura secado el material y la determinación de humedades. La prueba para determinar el CBR de campo al contrario, se hace necesario 1,942 horas hombre, esto sin tomar en cuenta el traslado al sitio y la determinación de la humedad.

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones

- La capacidad del suelo en las pruebas realizadas en el laboratorio no dan el valor de CBR más crítico, o para el 100% de saturación como es el supuesto.
- La capacidad de CBR que se midió en campo no fue confiable, debido a la incertidumbre y errores detectados en el procedimiento de las pruebas, aunque dos de los datos dieron aproximaciones aceptables con respecto a los valores esperados para las condiciones de humedad y saturación. El procedimiento se puede corregir para obtener mejores resultados. Cabe esperar que los resultados del CBR de campo puedan ser comparados con los gráficos generados en esta investigación, ya que se tiene una relación de la capacidad del suelo con su condición de saturación.
- En este trabajo no se pudo establecer la validez del factor de CBR de campo como parámetro de diseño, debido a la falta de pruebas realizadas. Según la proyección del CBR debido a las variantes de la humedad que se observó en laboratorio, cabe esperar que se pueda correlacionar el valor CBR tomado en campo y ser calibrado por medio de las gráficas donde se relaciona el comportamiento del suelo a sus diferentes saturaciones y densidades, para proyectar el factor de CBR a su condición crítica y esta sirva para el diseño de la estructura de pavimento.
- El valor de CBR crece cuando la densidad seca crece y la saturación decrece, cuando el valor de CBR decrece, es porque la densidad seca es menor y la saturación es cercana al 100%. Se estableció por medio de una superficie la cual depende de la

densidad, la humedad por el grado de saturación y el valor de CBR.

- Se establece que para las condiciones de la ruta en estudio, el diseño de la estructura de la carretera se ve afectada por las condiciones de saturación en el sitio a lo largo del año, esto sin tomar en cuenta los espesores mínimos de diseño, en un 22% a un 26% menor del espesor del diseño convencional, para un escenario lluvioso. Según los datos arrojados en el diseño probabilístico del pavimento es posible obtener estructuras pequeñas si se considera las condiciones del clima, a como normalmente se ha trabajado.
- Los cambios de volumen del suelo tienen un efecto en el valor de CBR y cuando este disminuye la capacidad de CBR aumenta.
- En términos de rendimiento para determinar un valor de CBR en el laboratorio se requiere de 19,554 horas hombre efectivas además de un promedio de siete días, para determinar humedades y sumergido de moldes. Para obtener un valor de CBR en el campo se ocupan 1,942 horas hombre de trabajo y un promedio de un día para la determinación de humedades.
- Es posible proyectar el valor de CBR que se da por la prueba de campo como un parámetro de diseño pero se debe contar con las gráficas de saturación, densidad y CBR, para el suelo que se esté estudiando.

## Recomendaciones

- Se debe realizar más pruebas de CBR de campo para obtener más datos en los que se pueda relacionar el CBR de

campo con el CBR de laboratorio. Y poder estimar un análisis estadístico de los datos obtenidos.

- La posibilidad de hacer pruebas a los diferentes tipos de suelos, podrá ampliar el comportamiento del CBR para las diferentes condiciones de saturación del suelo. Esto como posibles investigaciones.
- La continua evaluación y observación de las pruebas de campo como la condición

de poder mejorar y así identificar posibles errores, para ir depurando las pruebas.

- En las próximas investigaciones se deben tomar en cuenta el efecto de la carpeta asfáltica para determinar la humedad de la sub-rasante.
- Una continuación interesante es determinar como la humedad afectan el porcentaje de hinchamiento del suelo contra el porcentaje de saturación.

# Referencias

- AASHTO T89-02. "DETERMINING THE LIQUID LIMIT OF SOIL". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T90-70. "STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE PLASTIC LIMIT AND PLASTICITY INDEX OF SOILS". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T99-01. "MOISTURE-DENSITY RELATIONS OF SOILS USING A 2,5-KG RAMMER AND A 305-MM DROP". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T100-03. "SPECIFIC GRAVITY OF SOILS". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T191-02. "DENSITY OF SOIL IN-PLACE BY THE SAND-CONE METHOD". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T193-99. "Standard Method of Test for the California Bearing Ratio". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alfaro Soto. 2008. GEOTECNIA EN SUELOS NO SATURADOS. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(125). Pag. 471-481.
- ASTM D422-63. "STANDARD TEST METHOD FOR PARTICLE-SIZE ANALYSIS OF SOILS." American Society for Testing and Materials
- ASTM D423-66. "METHOD OF TEST FOR LIQUID LIMIT OF SOILS." American Society for Testing and Materials
- ASTM D424-59. "STANDARD METHOD OF TEST FOR PLASTIC LIMIT." American Society for Testing and Materials
- ASTM D698-00. "STANDARD TEST METHODS FOR LABORATORY COMPACTION CHARACTERISTICS OF SOIL USING STANDARD EFFORT (12,400 FT-LBF/FT<sup>3</sup> (600 KN-M/M<sup>3</sup>))." American Society for Testing and Materials
- ASTM D854-00. "STANDARD TEST METHODS FOR SPECIFIC GRAVITY OF SOIL SOLIDS BY WATER PYCNOMETER." American Society for Testing and Materials
- ASTM D1556-64. "STANDARD TEST METHOD FOR DENSITY AND UNIT WEIGHT OF SOIL IN PLACE BY THE SAND-CONE METHOD" American Society for Testing and Materials
- ASTM D1883-07. "STANDARD TEST METHOD FOR CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) OF LABORATORY-COMPACTED SOILS." American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.08, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D4429-04. "STANDARD TEST METHOD FOR CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) OF SOILS IN PLACE." American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.08, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Badilla Vargas Gustavo. 2009. DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO, MEDIANTE EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).

- Revista de Infraestructura Vial. LanammeUCR. Número 21.
- Barrera B. Mauricio, Garnica A. Paul y Martínez R. Federico. 2004. INFLUENCIA DE LA SUCCIÓN EN LOS CAMBIOS VOLUMÉTRICOS DE UN SUELO COMPACTADO. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 238. 141p.
- Bowles, Joseph E. (1981), "MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS EN INGENIERÍA CIVIL". Mc Graw-Hill Book Company.
- Chereque M. Wendor. HIDROLOGÍA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL. Lima – Perú. Obra auspiciada por CONCYTEC.
- Coronado Iturbide Jorge et all. "MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS." Guatemala 2002.
- Gutiérrez S. Eduardo. 2005. CONTROL DE COSTOS Y CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN DE CASAS DE INTERES SOCIAL. Proyecto final de graduación para optar por el grado de licenciatura, Escuela de Ingeniería en construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Korte L. Diana. 2009. ANÁLISIS DE LA COHESIÓN APARENTE PARA EL DISEÑO DE MUROS DE RETENCIÓN. Proyecto final de graduación para optar por el grado de licenciatura de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 132p.
- Ladd R. S. 1978 PREPARING TEST SPECIMENS USING UNDERCOMPACTION. Geotechnical Testing Journal. GTJODJ, Vol. 1. pp. 16-23.
- Moncayo V. Jesús. 1987. MANUAL DE PAVIMENTOS, ASFALTO, ADOQUIN, EMPEDRADO Y CONCRETO. México: Editorial Continental S.A.
- MOPT, 1966. "NORMAS Y DISEÑOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS". Quinta edición.
- Niebel Benjamin W.; Freivalds Andris. 2004. MÉTODOS, ESTÁNDARES Y DISEÑO DEL TRABAJO. México. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Norma NLT-111/78. "ÍNDICE CBR EN LABORATORIO". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España.
- Norma NLT-112/58. "ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE CBR IN SITU". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España.
- Ortiz Q. Giannina; Paniagua M. Eduardo. 2006. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Paniagua C. Ana. 2006. RENDIMIENTOS DE LA MANO DE OBRA EN CONSTRUCCIÓN DE CASAS DE MADERA. Proyecto final de graduación para optar por el grado de licenciatura, Escuela de Ingeniería en construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rodríguez Pablo del Águila. 2007. DETERMINACIÓN DEL MODULO RESILIENTE DEL SUELO DE FUNDACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO MECANÍSTICO-EMPERISISTA.
- Rojas J. C. 2001. Conceptos básicos de mecánica de suelos no-saturados. GEOTECNIA. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON. Número 6. Pag. 6 – 8.
- Rosenblueth Emilio. 1975 POINT ESTMATES FOR PROBABILITY MOMENTS. Mathematics. Vol. 72. No. 10. pp. 3812-3814.
- Schosinsky Gunther. 2007. CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE



- SUELOS. Revista Geológica de América Central. 18 pag.
- Schosinsky Gunther, Losilla Marcelino. 1999. MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL. Revista Geológica de América Central. 13 pag.
- Serpell B. Alfredo. 2002. ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES DE CONSTRUCCIÓN. México. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Uzcategui B. Germán. 1980. HIDROLOGÍA GENERAL. Mérida – Venezuela. CIDIAT.
- Valverde R. Enrique. 2010. ANÁLISIS EN LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ESFUERZO DE SUCCIÓN Y LA ESTABILIDAD DE UN TALUD. Proyecto final de graduación para optar por el grado de licenciatura de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 84p.
- Villalobos Roberto, Retana José. 1997. SISTEMA DE PRONÓSTICO DE LLUVIAS EN COSTA RICA. AGRUPACIÓN DE AÑOS CON CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS SEMEJANTES PARA LA CREACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo.

# Apéndice

Va constar de los siguientes documentos:

1. Va constar de las figuras que representan las isocargas del método de los polígonos de Thiessen mejorado para cada región.
2. Hojas formulario para determinar rendimientos y productividad.
3. Equipo y herramientas que se utilizaron en el proceso de investigación.
4. Hoja formulario de los datos de CBR de campo.
5. Gráficos de la prueba de límites de Atterberg.
6. Gráficos de CBR de laboratorio.
7. Gráficos de CBR de campo.

# Apéndice 1

Para determinar la precipitación media por medio de polígonos de Thiessen mejorado, se tuvo que identificar la influencia de cada estación, para cada uno de los meses del año lo que generan las siguientes figuras.

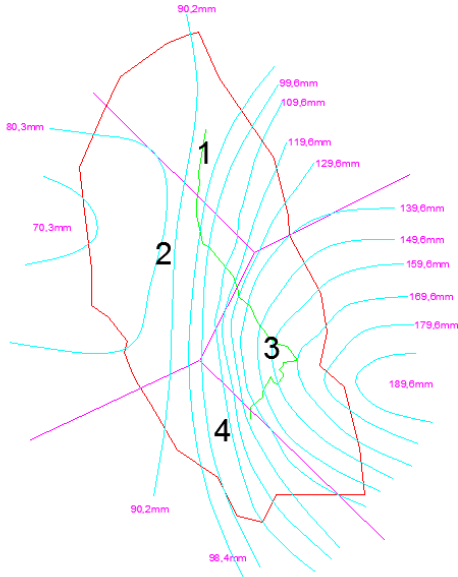


Figura 1.1. Polígono de Thiessen mejorado para mes de enero. (Bustillos, 2010).

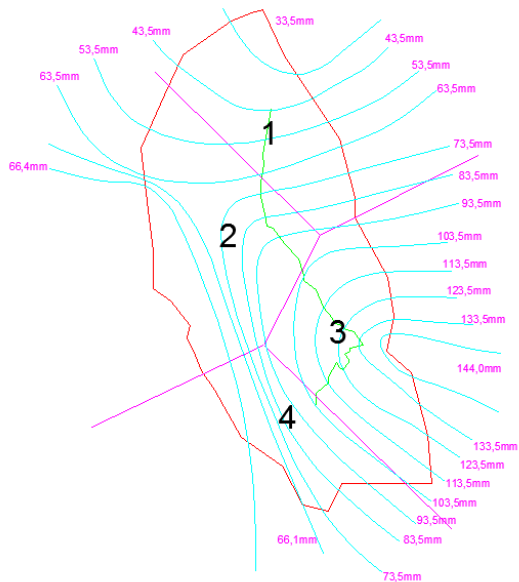


Figura 1.2. Polígono de Thiessen mejorado para mes de febrero. (Bustillos, 2010).

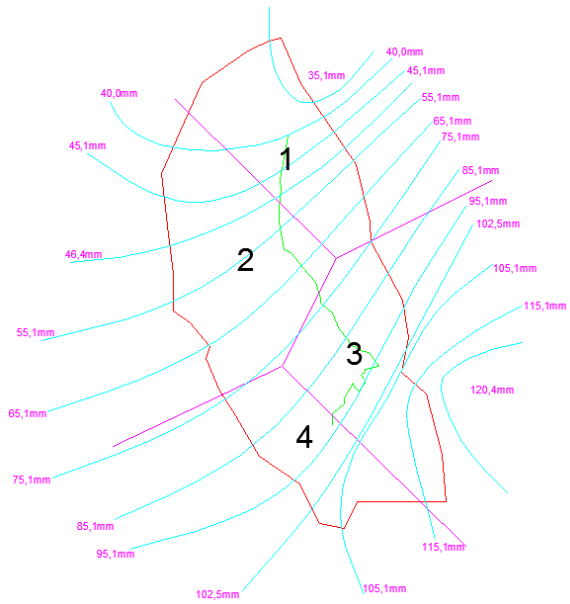


Figura 1.3. Polígono de Thiessen mejorado para mes de marzo. (Bustillos, 2010).

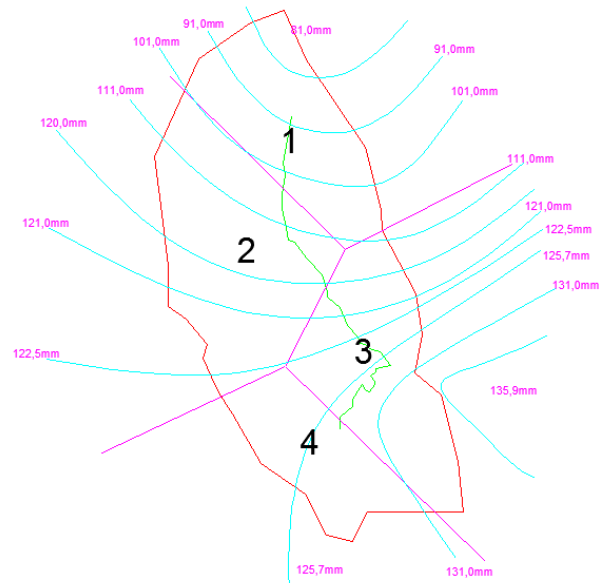


Figura 1.4. Polígono de Thiessen mejorado para mes de abril. (Bustillos, 2010).

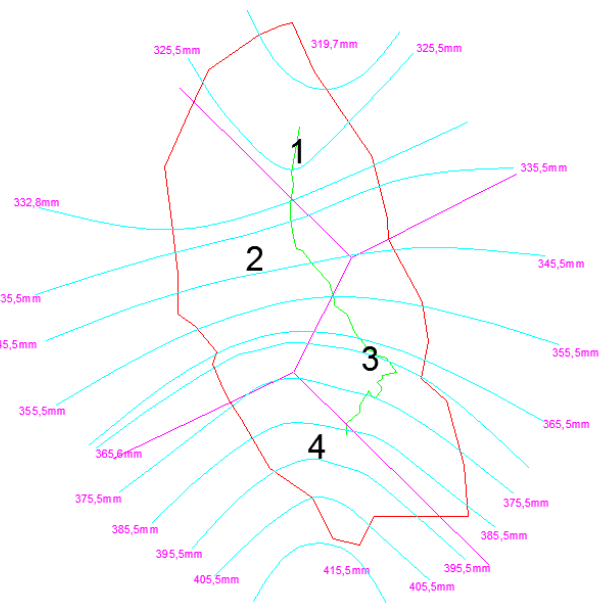


Figura 1.5. Polígono de Thiessen mejorado para mes de mayo. (Bustillos, 2010).

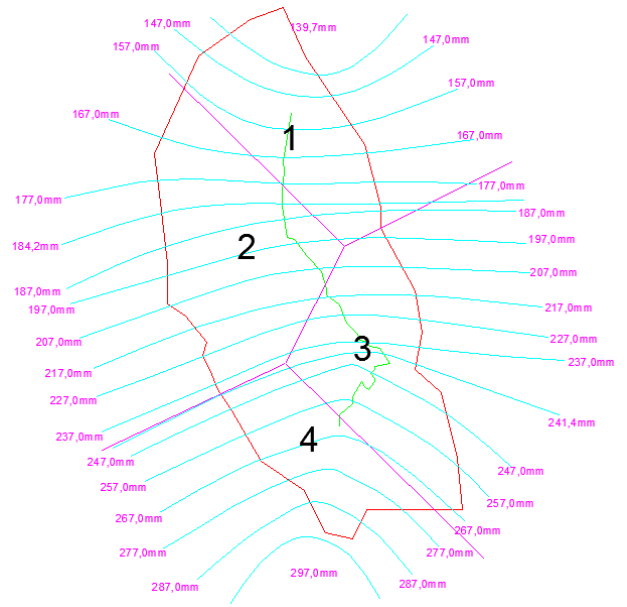


Figura 1.7. Polígono de Thiessen mejorado para mes de julio. (Bustillos, 2010).

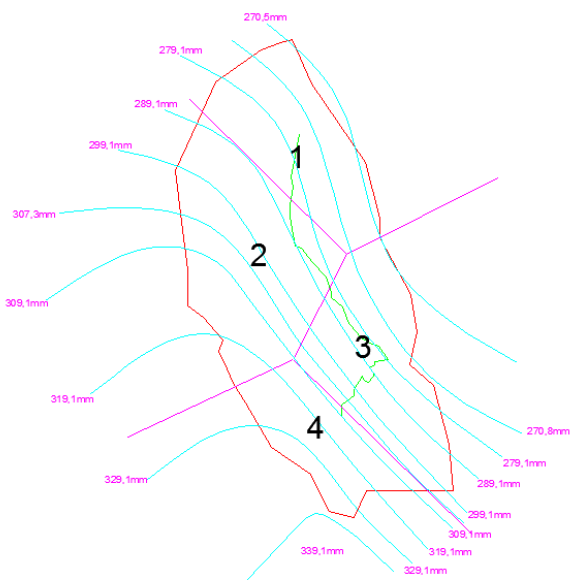


Figura 1.6. Polígono de Thiessen mejorado para mes de junio. (Bustillos, 2010).

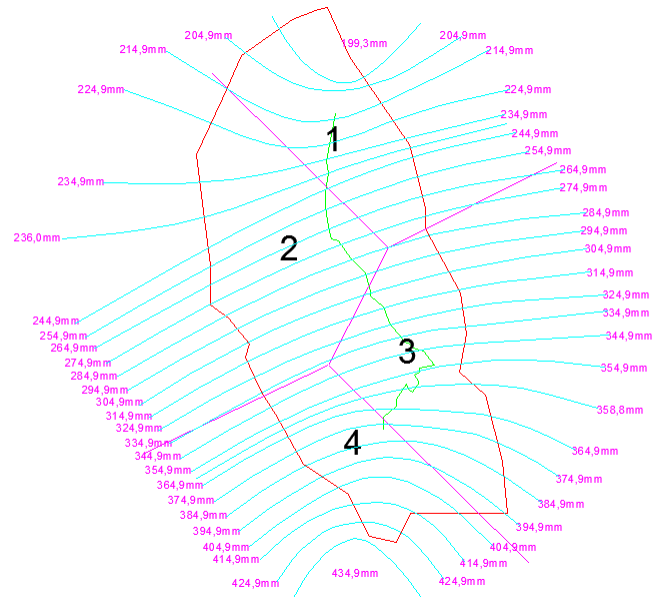


Figura 1.8. Polígono de Thiessen mejorado para mes de agosto. (Bustillos, 2010).

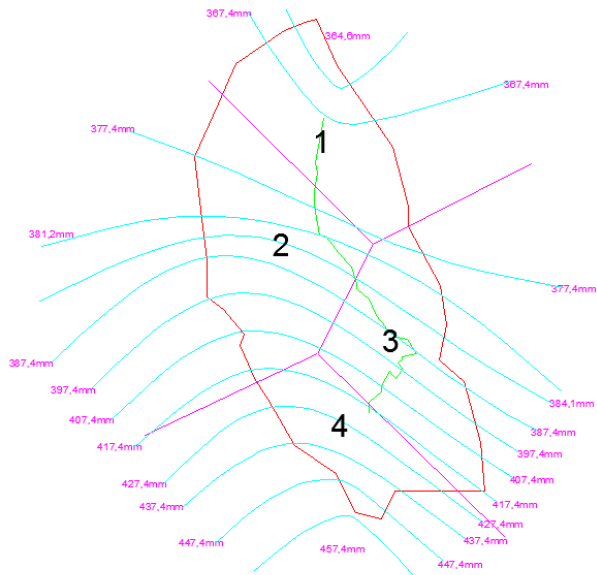


Figura 1.9. Polígono de Thiessen mejorado para mes de setiembre. (Bustillos, 2010).

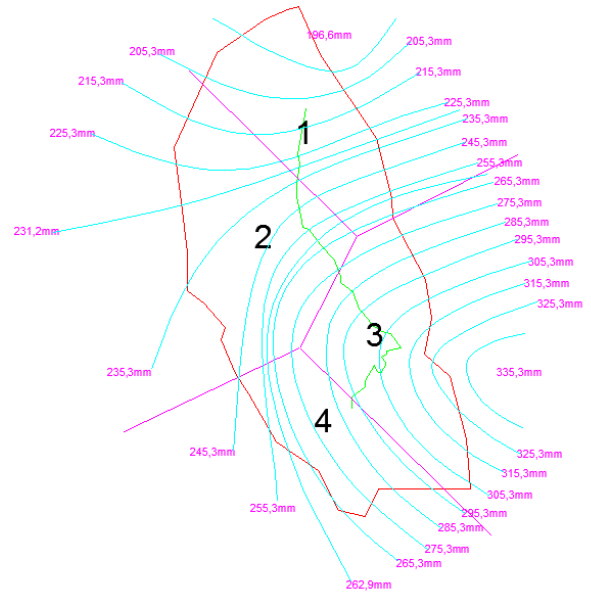


Figura 1.11. Polígono de Thiessen mejorado para mes de noviembre. (Bustillos, 2010).

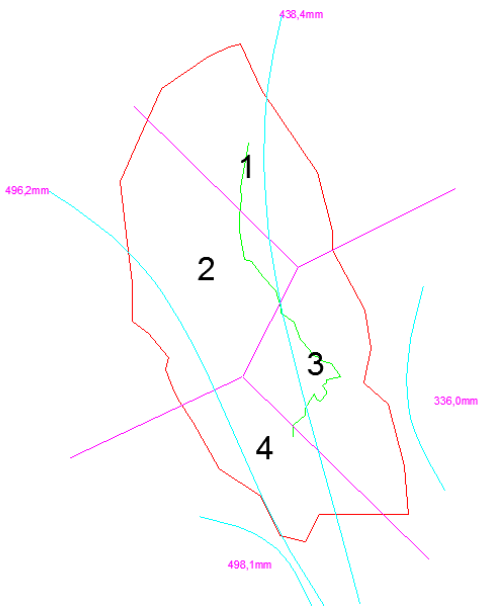


Figura 1.10. Polígono de Thiessen mejorado para mes de octubre. (Bustillos, 2010).

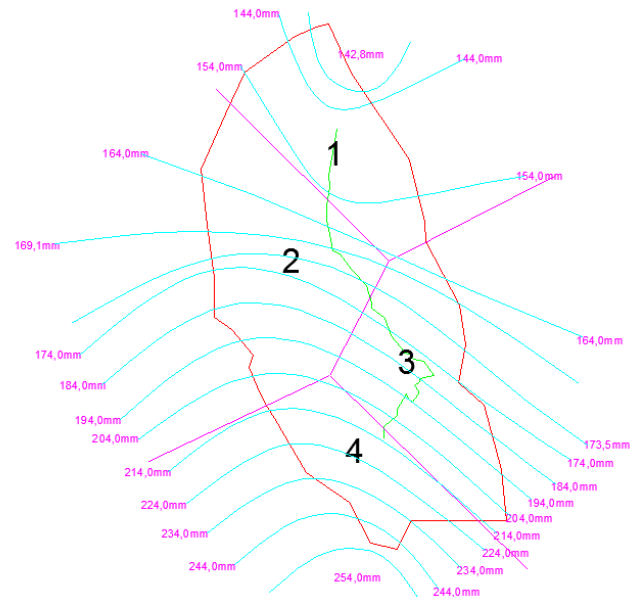


Figura 1.12. Polígono de Thiessen mejorado para mes de diciembre. (Bustillos, 2010).

# Apéndice 2

Table of random numbers

49 54 43 54 82	17 37 93 23 78	87 35 20 96 43	84 26 34 91 64
57 24 55 06 88	77 04 74 47 67	21 76 33 50 25	83 92 12 06 76
16 95 55 67 19	98 10 50 71 75	12 86 73 58 07	44 39 52 38 79
78 64 56 07 82	52 42 07 44 38	15 51 00 13 42	99 66 02 79 54
09 47 27 96 54	49 17 46 09 62	90 52 84 77 27	08 02 73 43 28
44 17 16 58 09	79 83 86 19 62	06 76 50 03 10	55 23 64 05 05
82 97 77 77 99	83 11 46 32 24	20 14 85 88 45	10 93 72 88 71
82 97 77 77 81	07 45 32 14 08	32 98 94 07 72	93 85 79 10 75
50 92 26 (11) 97	00 56 76 31 38	80 22 02 53 53	86 60 42 04 53
83 39 50 08 30	42 34 07 96 88	54 42 06 87 98	35 85 29 48 39
40 33 20 38 26	13 89 51 03 74	17 76 37 13 04	07 74 21 19 30
96 83 50 87 75	97 12 25 93 47	70 33 24 03 54	97 77 46 44 80
88 42 95 45 72	16 64 36 16 00	04 43 18 66 79	94 77 24 21 90
33 27 14 34 09	45 59 34 68 49	12 72 07 34 45	99 27 72 95 14
50 27 89 87 19	20 15 37 00 49	52 85 66 60 44	38 68 88 11 80
55 74 30 77 40	44 22 78 84 26	04 33 46 09 52	68 07 97 06 57
59 29 97 68 60	71 91 38 67 54	13 58 18 24 76	15 54 55 95 52
48 55 90 65 72	96 57 69 36 10	96 46 92 42 45	97 60 49 04 91
66 37 32 20 30	77 84 57 03 29	10 45 65 04 26	11 04 96 67 24
68 49 69 10 82	53 75 91 93 30	34 25 20 57 27	40 48 73 51 92
83 62 64 11 12	67 19 00 71 74	60 47 21 29 68	02 02 37 03 31
06 09 19 74 66	02 94 37 34 02	76 70 90 30 86	38 45 94 30 38
33 32 51 26 38	79 78 45 04 91	16 92 53 56 16	02 75 50 95 98
42 38 97 01 50	87 75 66 81 41	40 01 74 91 62	48 51 84 08 32
96 44 33 49 13	34 86 82 53 91	00 52 43 48 85	27 55 26 89 62
64 05 71 95 86	11 05 65 09 68	76 83 20 37 90	57 16 00 11 66
75 73 88 05 90	52 27 41 14 86	22 98 12 22 08	07 52 74 95 80
33 96 02 75 19	07 60 62 93 55	59 33 82 43 90	49 37 38 44 59
97 51 40 14 02	04 02 33 31 08	39 54 16 49 36	47 95 93 13 30
15 06 15 93 20	01 90 10 75 06	40 78 78 89 62	02 67 74 17 33
22 35 85 15 33	92 03 51 59 77	59 56 78 06 83	52 91 05 70 74
09 98 42 99 64	61 71 62 99 15	06 51 29 16 93	58 05 77 09 51
54 87 66 47 54	73 32 08 11 12	44 95 92 63 16	29 56 24 29 48
58 37 78 80 70	42 10 50 67 42	32 17 55 85 74	94 44 67 16 94
87 55 56 22 41	26 78 63 06 55	13 08 27 01 50	15 29 39 39 43
71 41 61 50 72	12 41 94 96 26	44 95 27 36 99	02 96 74 30 83
23 52 23 33 12	96 93 02 18 39	07 02 18 36 07	25 99 32 70 23
31 04 49 69 96	10 47 48 45 88	13 41 43 89 20	97 17 14 49 17
31 99 73 68 68	35 81 33 03 76	24 30 12 48 60	18 99 10 72 34
94 58 28 41 36	45 37 59 03 09	90 35 57 29 12	82 62 54 65 60

Muestra previa de productividad.

Proyecto:			Fecha:		
Actividad:			Condicion del Clima:		
Intervalo de tiempo			Nº de trabajadores:		
			Descripción		
Observaciones	Hombres Trabajando	Hombres No Trabajando	Observaciones	Hombres Trabajando	Hombres No Trabajando
1			31		
2			32		
3			33		
4			34		
5			35		
6			36		
7			37		
8			38		
9			39		
10			40		
11			41		
12			42		
13			43		
14			44		
15			45		
16			46		
17			47		
18			48		
19			49		
20			50		
21			51		
22			52		
23			53		
24			54		
25			55		
26			56		
27			57		
28			58		
29			59		
30			60		
				Total	
Observaciones				Muestras	0
				Trabajando	0
				No trabajando	0
				Productividad (p)	0
*Anotar ciclos del proceso					

Muestreo de Productividad

Proyecto		Fecha															
Actividad		Condición del clima															
		Nº trabajadores															
		Descripción															
Ciclos		A- Profundizado B- Extracción del material C- Colocar el material al saco				D- Colocar colilla en los sacos E- Amarre y traslado de sacos F- Relleno de hueco				G- Cargar el carro H- Descanso I- Trasladarse				J- Charla K-Espera L- Otros			
		<b>Hombres trabajando</b>							<b>Hombres no trabajando</b>								
Tiempos	Obs.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L				
	1																
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
	9																
	10																
	11																
	12																
	13																
	14																
	15																
	16																
	17																
	18																
	19																
	20																
	n																

Totales		Nº	%		Nº	%		Nº	%		Nº	%
	A=			D=			G=			J=		
	B=			E=			H=			K=		
	C=			F=			I=			L=		

Muestras=	
Trabajando=	
No Trabajando=	
Productividad=	

Observaciones



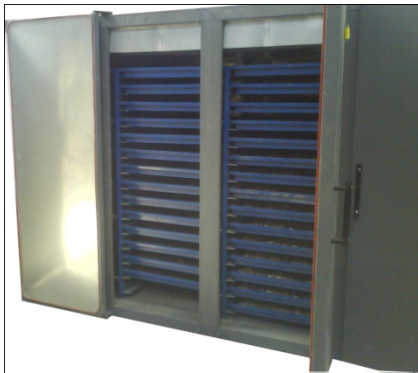
Tabla para rendimientos

Actividad:	Cond. Clima:		Hora		Fecha:		Volumen de trabajo
	Inicial	Final					
Nº Trabajadores:							
Actividades	Tiempo						Total (min)
	30"	1'	5'	10'	30'	1hr	
Trabajado							
Café							
S.S.							
Instrucciones							
Revisión del lugar							
Almuerzo							
Fumar							
Descansos							
Tomar agua							
Trasladarse							
Otros							
Observaciones							

## Apéndice 3

### Secado y preparación del material

Cuando se lleva a cabo el muestreo en campo el material está húmedo y forma grumos, este se lleva al laboratorio el cual debe ser secado y como práctica del MOPT se separa el material fino (pasa la malla N°4) del material grueso (el retenido por la malla N°4) y se almacena en cajones para su posterior uso en las pruebas que se deban realizar.



Horno  
OVENTEC  
Modelo: LI170340



Tamizador mecánico  
Gilson



Cajones

1  
2

### Límites de Attenberg

1



Máquina de Casagrande  
ELE International Soiltest  
Modelo: CL-205  
Serie: 9704

Contador  
Durant  
Modelo: 4-x-7-1-R-AC  
Serie: 996

### Equipo micelaneo

- a. Espatula
- b. Acanalador
- c. Capsula
- d. Vidrio
- e. Recipiente para mezclar

## Granulometría

1



Máquina de tamizaje  
HUMBOLDT  
Modelo: H-4325  
Serie: 07104325

### Mallas

#10  
#20  
#30  
#40  
#60  
#70  
#100  
#200

## Prueba Proctor Estándar



### Herramientas misceláneas

- a. Mazo
- b. Molde de 101mm diámetro
- c. Cuchara de pulpero
- d. Brochas
- e. Regla de metal
- f. Espátula
- g. Probeta de 1000ml
- h. Vernier
- i. Bandejas para secado

## CBR en laboratorio



Máquina de CBR  
ELE CBR TEST  
Serie: 1729 4 1222

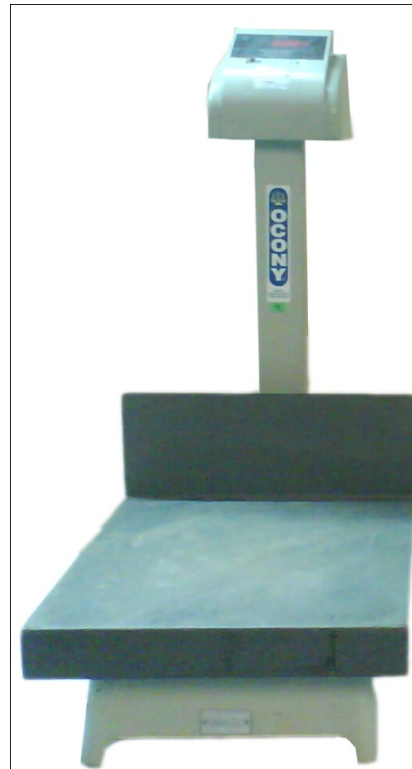
Anillo  
HUMBOLDT  
H-4454A

Reloj de anillo  
HUMBOLDT  
 $\pm 0.0001''$

Reloj de deformímetro  
ELE  
 $\pm 0.001''$



Pila para sumergido de los moldes.



Balanza usada para Proctor y CBR

WEYLUX  
Modelo: 850  
Capacidad 10Kg, división en 10g.

## Gravedad específica



Horno



Batidora  
Hamilton Beach Drink Mixer Soiltest  
Modelo: 936



Deformímetro  
ELE  
 $\pm 0.001''$

- Herramientas micelaneas
- Picnómetro de 500ml
  - Embudo
  - Pipeta
  - Cuchara de pulpero
  - Capsula de porcelana
  - Espátula

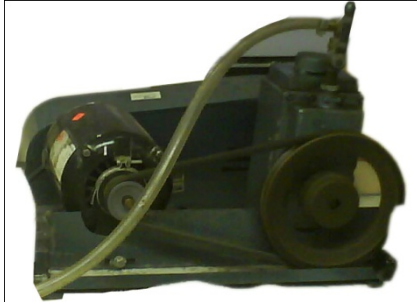


Balanza  
Explorer Pro OHAUS Corporation  
Modelo: EP8101C



Balanza analítica  
Explorer OHAUS  
Modelo: E0D120





Bomba para succión.  
ELE Soiltest  
Modelo: LT-420



Baño maría  
Humboldt  
Modelo: H-1394

## Conformación por Sub-Compactación



Equipo micelaneo  
a. Mazo de plástico

- b. Cinta blanca
- c. Vernier
- d. Varilla
- e. Espátula
- f. Cuchara de pulpero
- g. Probeta de 1000ml
- h. Bandeja para secado



Molde 151 mm diámetro  
Mazo sin camisa  
Plato de metal

## CBR de campo



Gatas hidráulicas  
Anillo de carga  
Gata mecánica  
Extensiones  
Discos de carga  
Relojes de deformación  
Pistón de penetración  
Vagoneta aproximadamente de 10 Ton y cargada  
con 4,5 Ton.

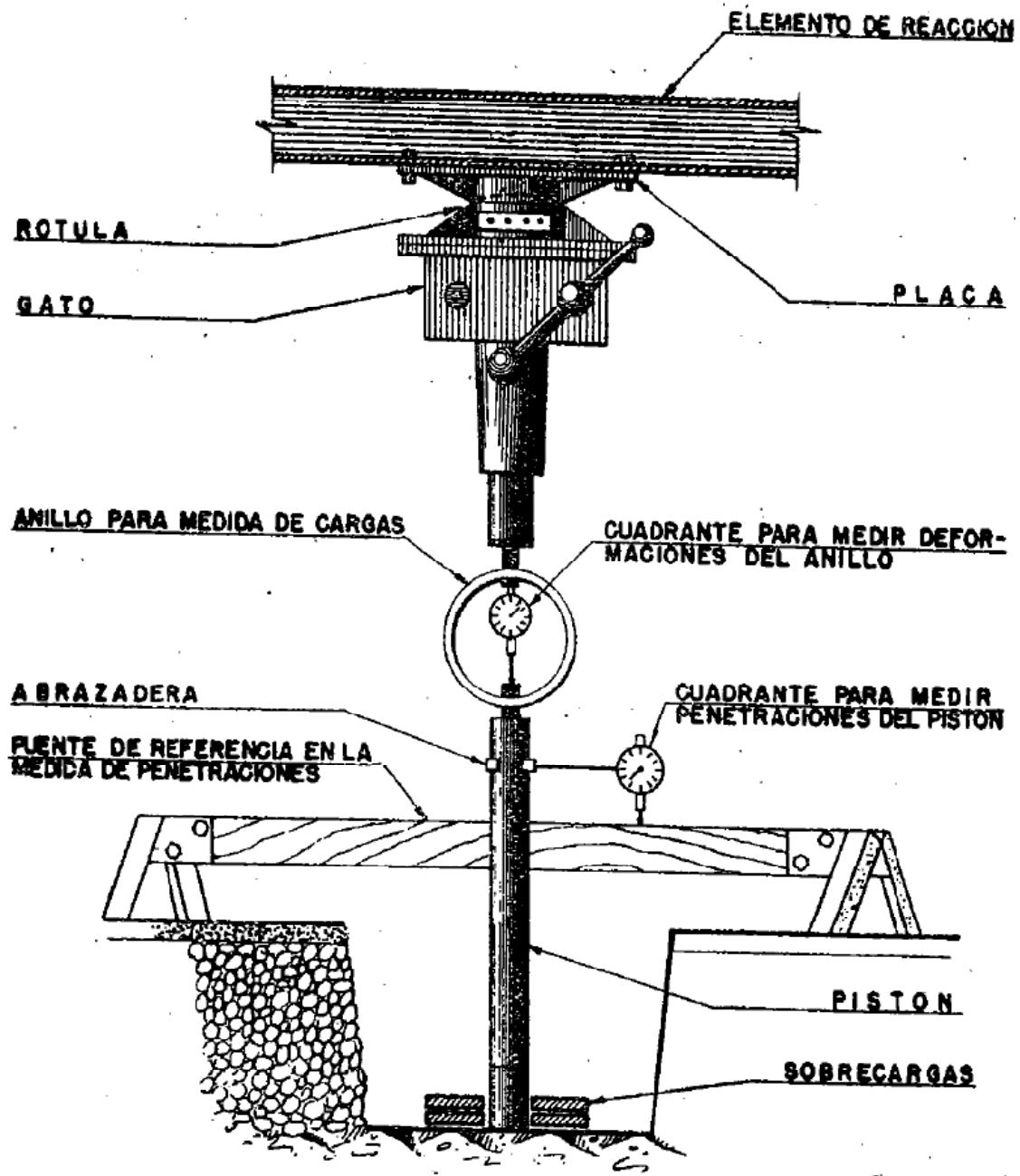


Gaza, deformímetro y viga de referencia.

Anillo  
HUMBOLDT  
Modelo: H4454  
Serie: 1955  
Reloj de anillo  
ELE  
 $\pm 0.0001''$

Deformímetro  
ELE  
 $\pm 0.001''$





# Apéndice 4

## Formulario para CBR en sitio. (ASTM D2244)

Proyecto: \_\_\_\_\_

Muestra: \_\_\_\_\_ Uso: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Estación: \_\_\_\_\_ Anillo: \_\_\_\_\_

### Densidad

N° Embase	Embase (g)	Peso inicial	Peso final

	Bandeja (g)	
	B+Muestra H (g)	
	B+Muestra S (g)	

### Humedad

N° Prueba	Bandeja	Peso Bandeja	Bandeja+Muestra H	Bandeja+Muestra S

### Esfuerzo contra Penetración

N° Pruebas	0,025	0,050	0,075	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500

Observaciones

Prueba	Tiempo

## Apéndice 5

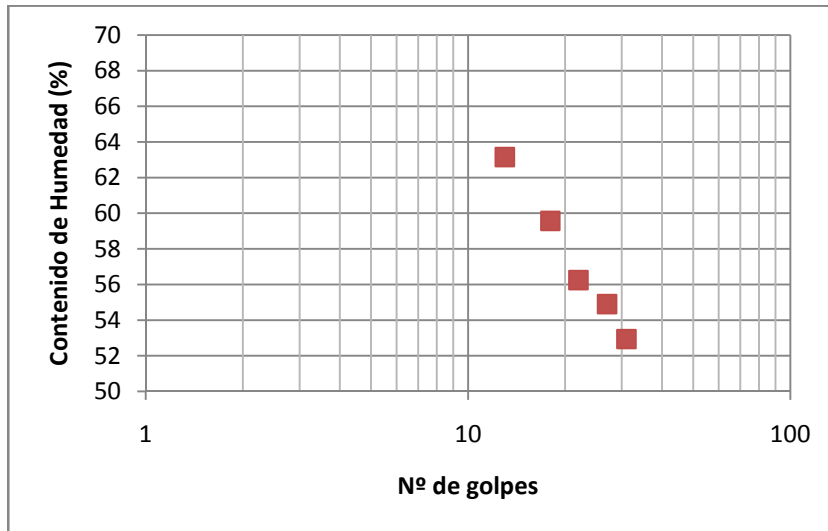


Figura 5.1. Número de golpes versus porcentaje de contenido de humedad, en la estación 3+900, en la determinación del límite líquido.

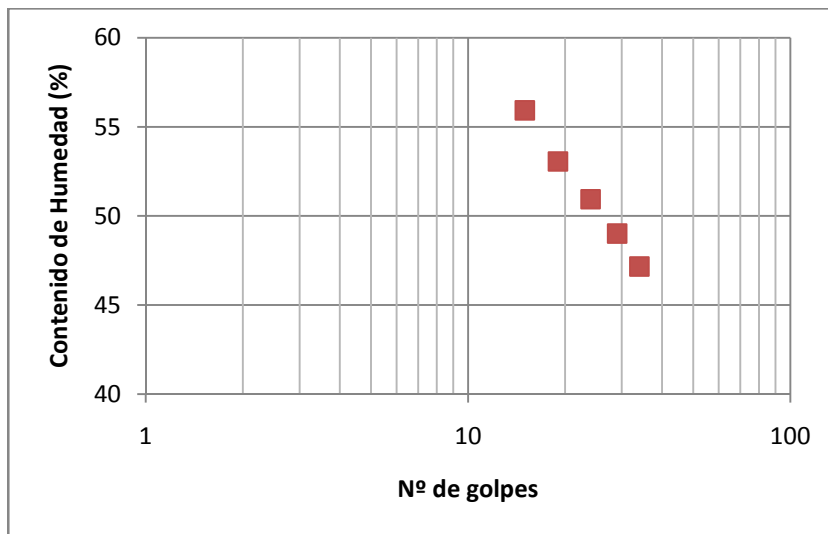


Figura 5.2. Número de golpes versus porcentaje de contenido de humedad, en la estación 2+700, en la determinación del límite líquido.

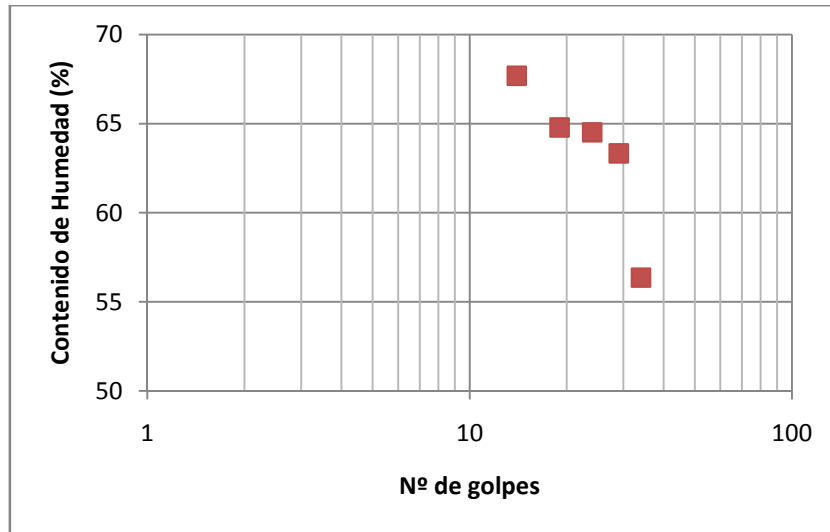


Figura 5.3. Número de golpes versus porcentaje de contenido de humedad, en la estación 1+900, en la determinación del límite líquido.

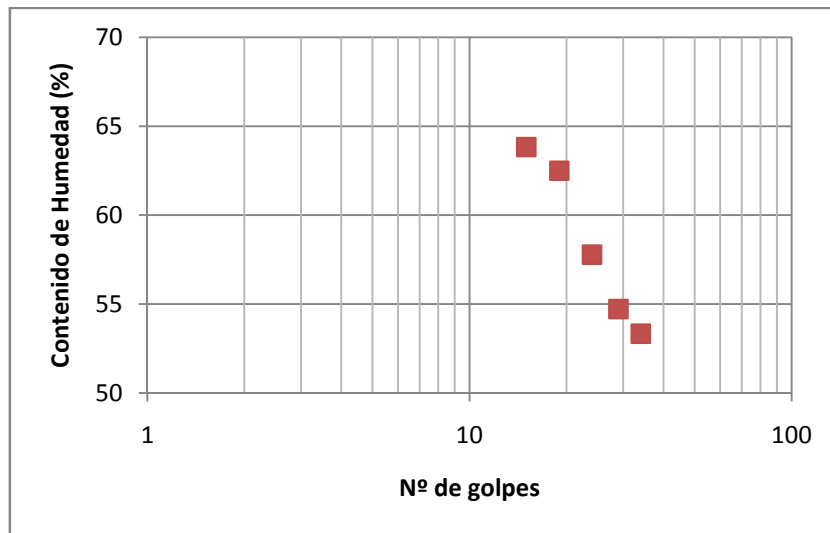


Figura 5.4. Número de golpes versus porcentaje de contenido de humedad, en la estación 1+000, en la determinación del límite líquido.

## Apéndice 6

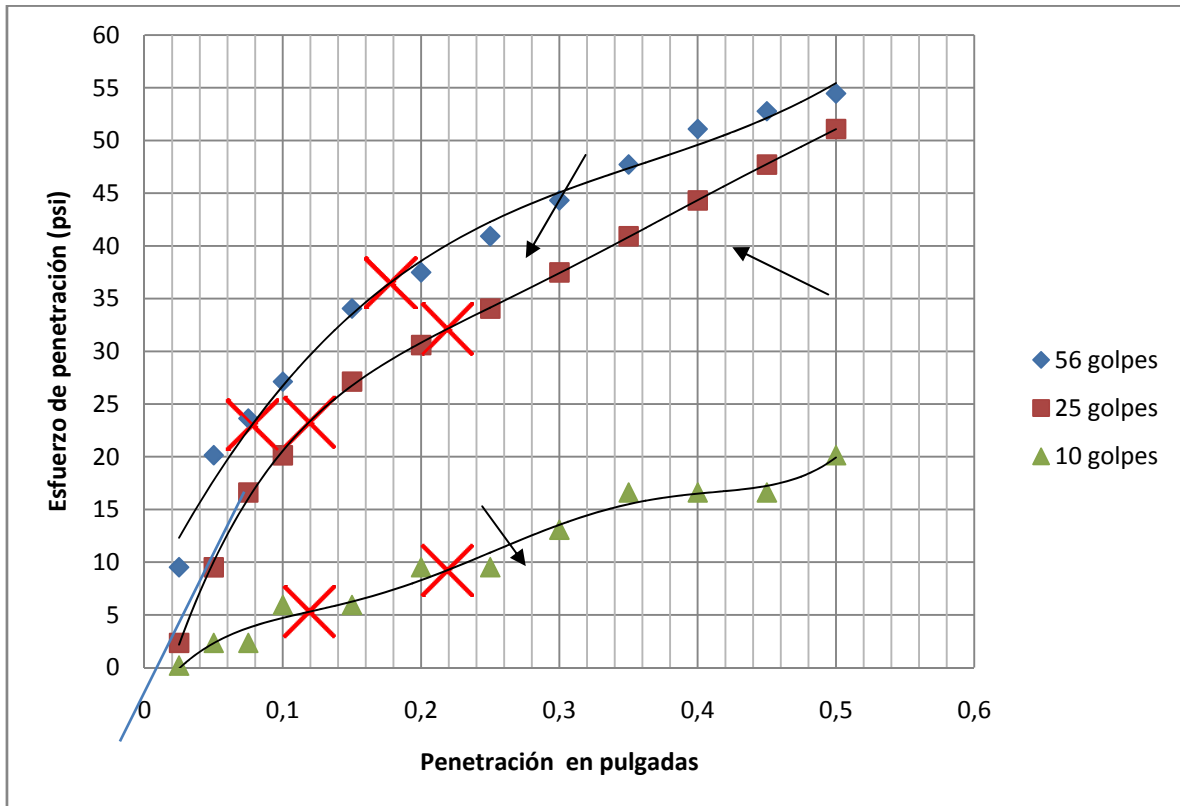


Figura 6.1. Penetración del pistón de CBR versus el esfuerzo de penetración, con las curvas de mejor ajuste y corrección del cero, para la estación 3+900.

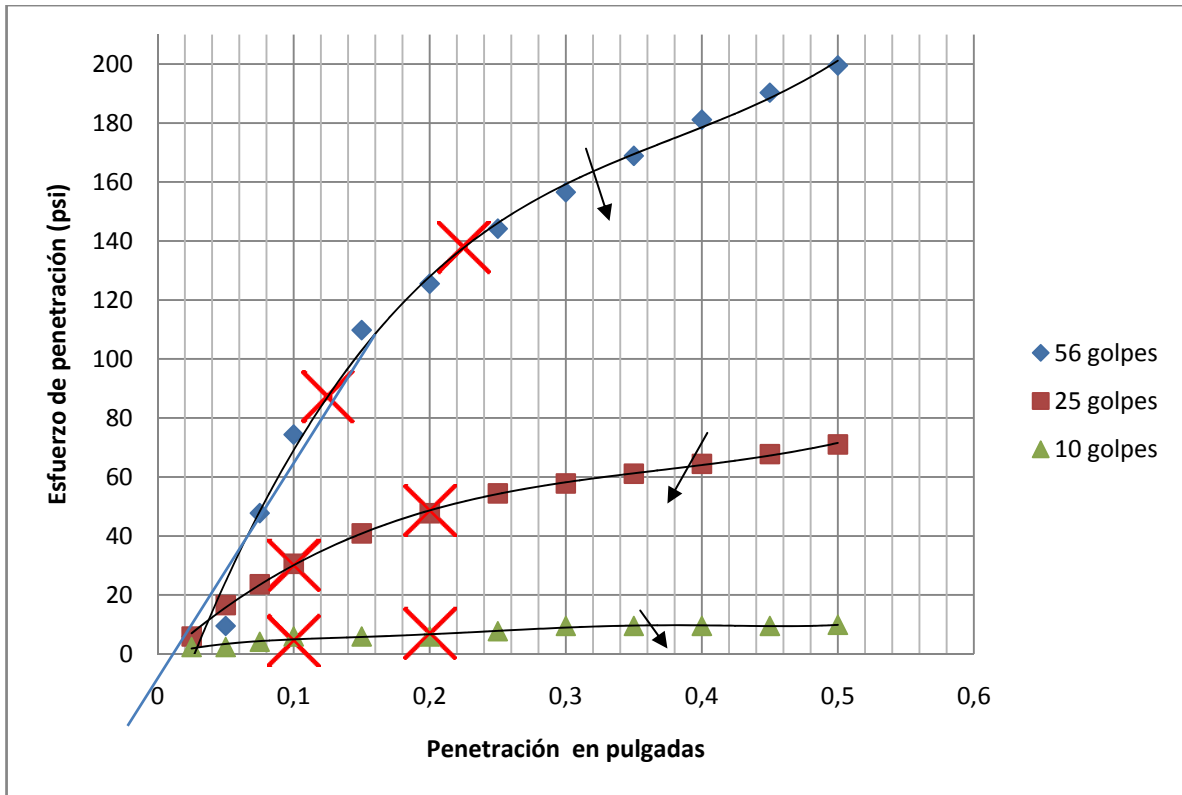


Figura 6.2. Penetración del pistón de CBR versus el esfuerzo de penetración, con las curvas de mejor ajuste y corrección del cero, para la estación 2+700.

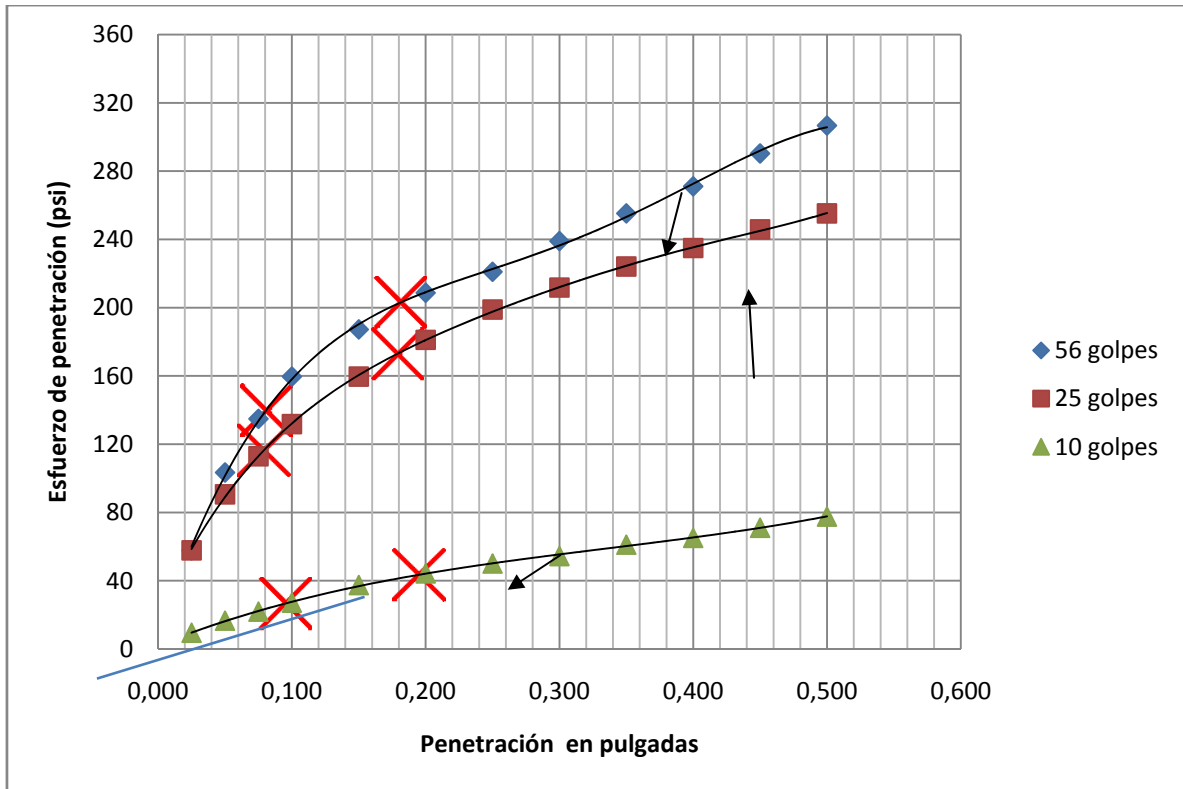


Figura 6.3. Penetración del pistón de CBR versus el esfuerzo de penetración, con las curvas de mejor ajuste y corrección del cero, para la estación 1+900.



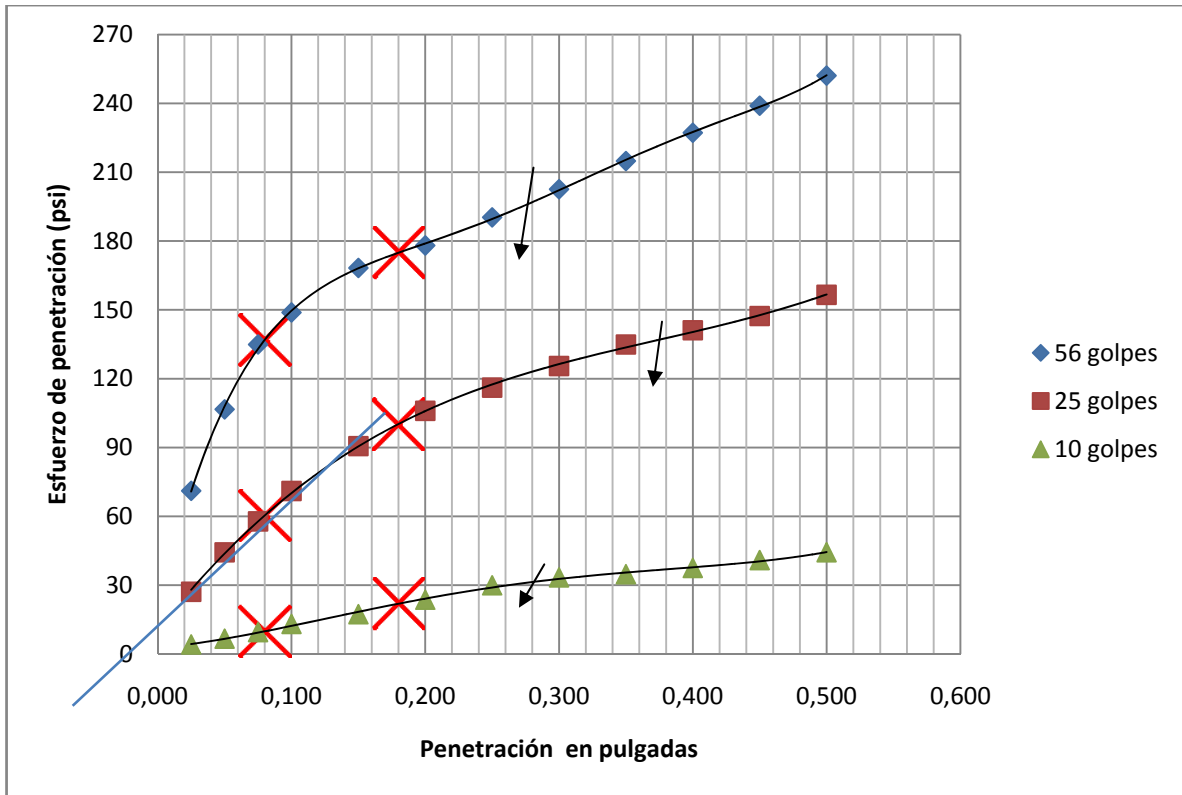


Figura 6.4. Penetración del pistón de CBR versus el esfuerzo de penetración, con las curvas de mejor ajuste y corrección del cero, para la estación 1+000.

## Apéndice 7

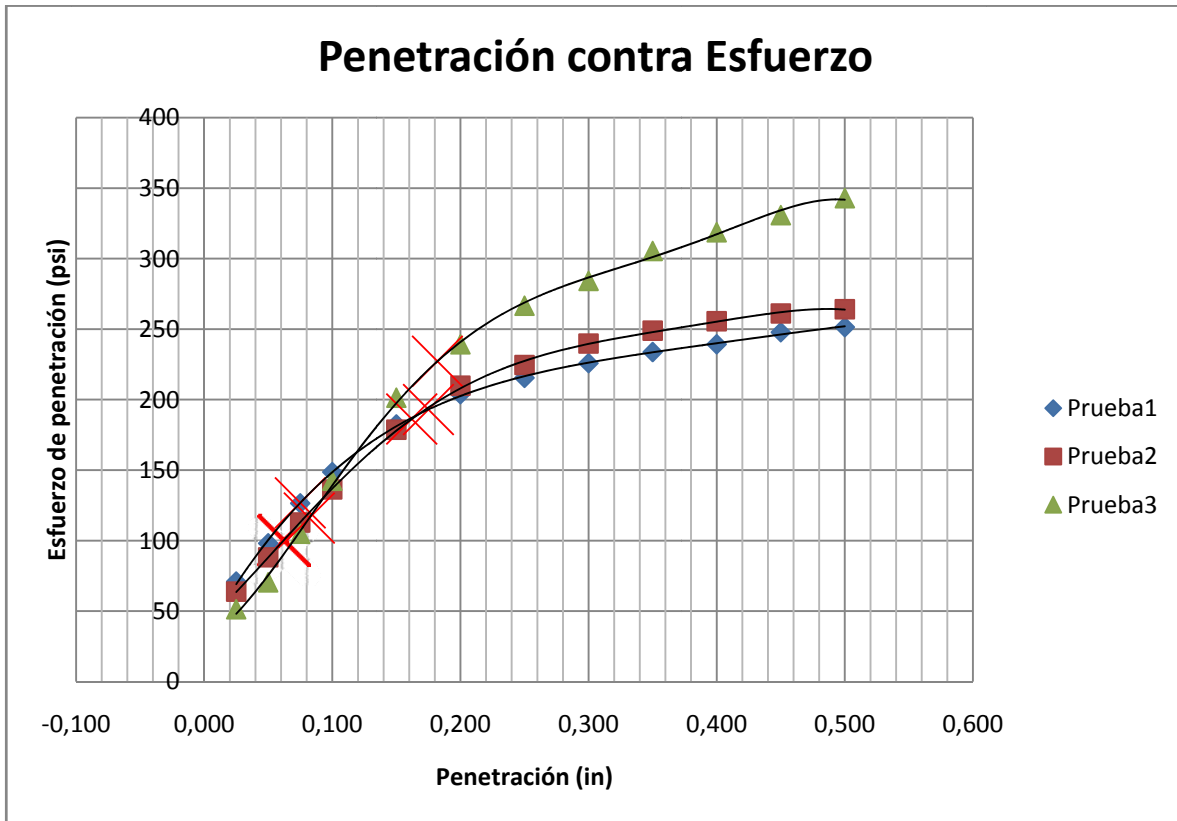


Figura 7.1. Penetración versus esfuerzo de penetración de CBR en campo, para tres pruebas cercanas en la estación 3+750.

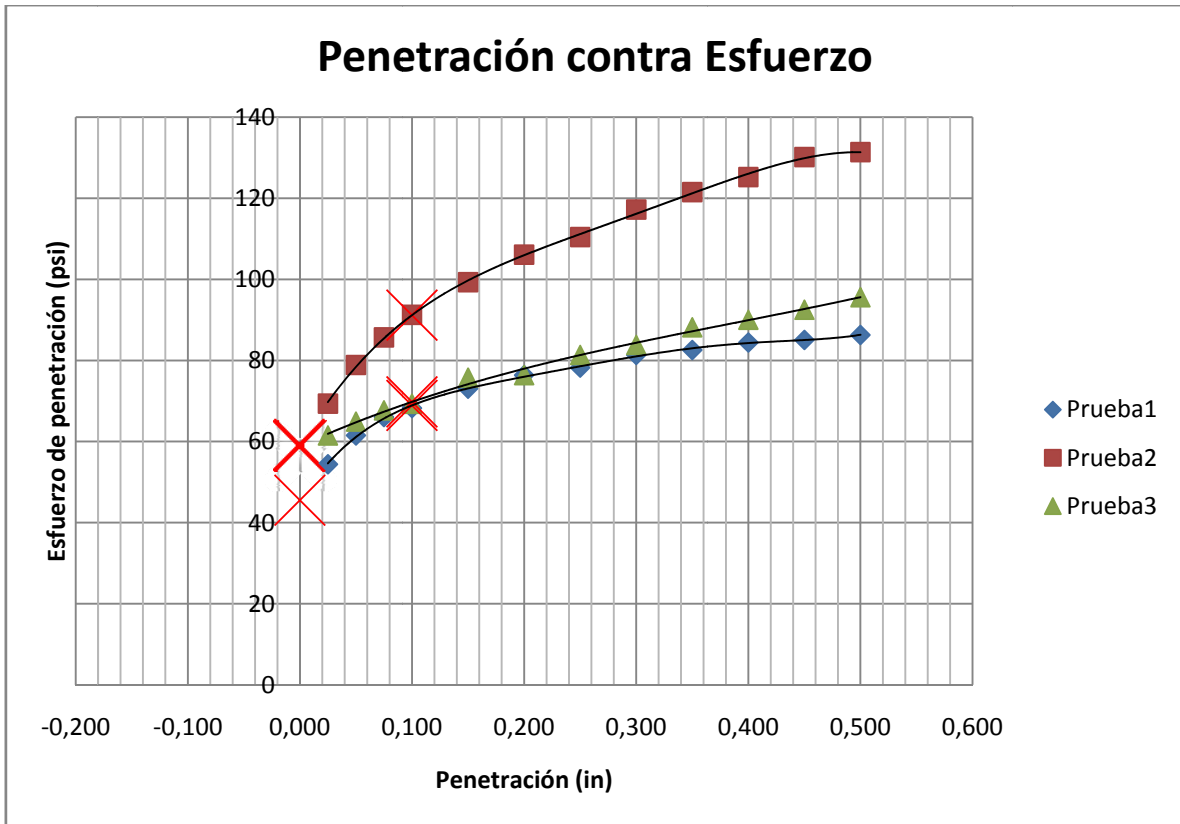


Figura 7.2. Penetración versus esfuerzo de penetración de CBR en campo, para tres pruebas cercanas en la estación 2+700.

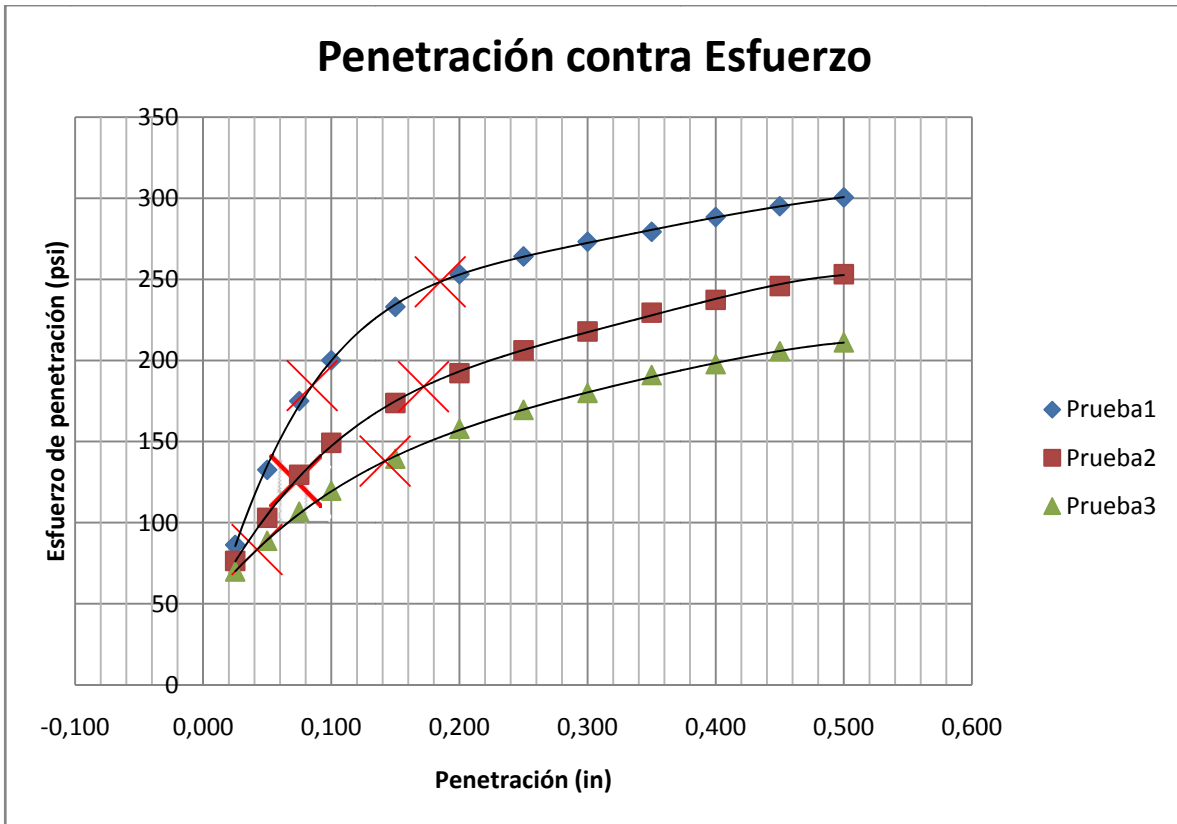


Figura 7.3. Penetración versus esfuerzo de penetración de CBR en campo, para tres pruebas cercanas en la estación 1+900.

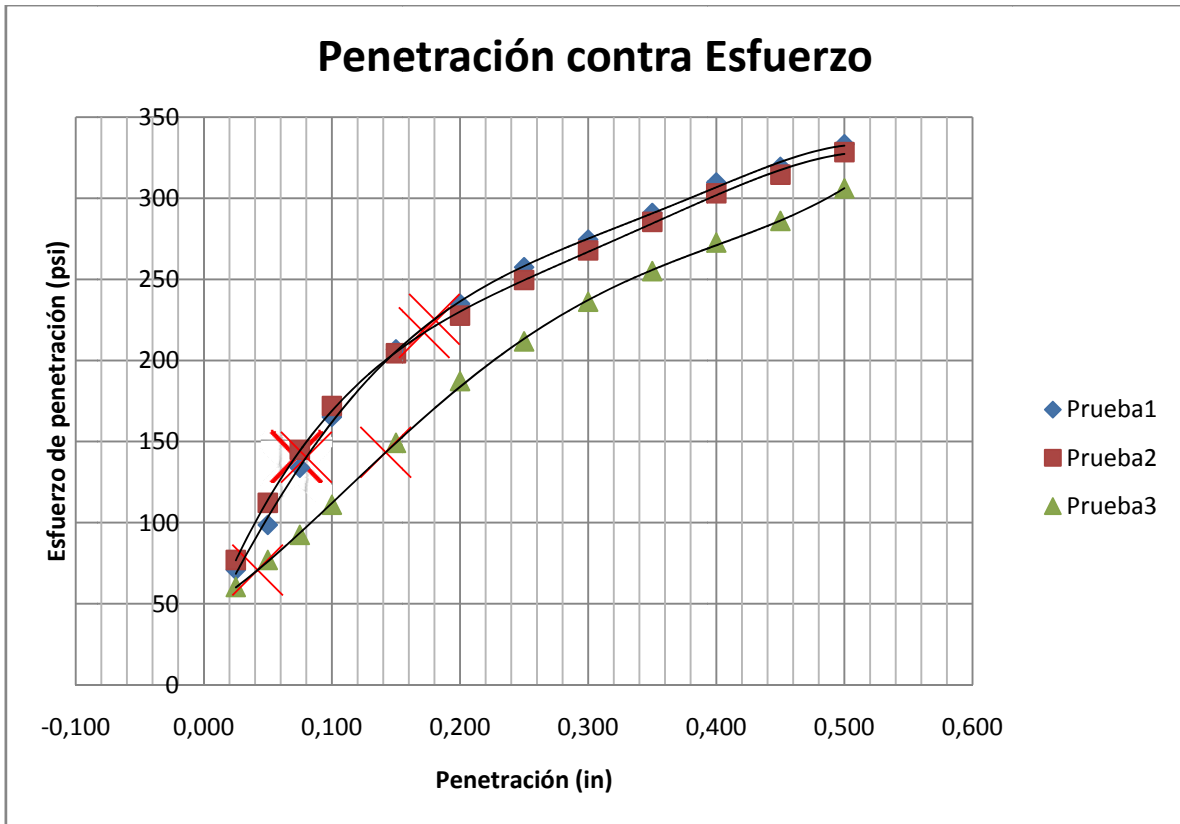


Figura 7.4. Penetración versus esfuerzo de penetración de CBR en campo, para tres pruebas cercanas en la estación 1+000.

# Anexos

Los anexos va contar con los siguientes documentos:

1. Informe oficial extendido por el MOPT de una base y sub-base para el diseño del pavimento.
2. Datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas, dadas por Instituto Meteorológico Nacional.
3. Factor de ejes equivalentes, tablas de diseño del Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos.
4. Informes de LANAMME de calibración de los anillos que se usaron para el fallo de CBR.

# Anexo 1

**Informe de Ensayos en Base Granular**

**Información General:**

MOPT, Dirección Regional I Colima. Informe Número **BG-E-09-015**  
 Proyecto: Compra de Agregados Triturados, Licitación Pública 2008LN-000019-32700 Fecha Impresión 31/08/2009  
 Solicitado por: Ing. Nelson Brown.  
 Oficio: Sin Oficio.

**Descripción de la muestra:**

Fuente de Materiales: Quebrador MECCO, Guápiles. Muestra Número: IM-SBE-09-309  
 Ubicación de la Muestra: Apilamiento (Plantel del MOPT, Colima). Fecha Muestreo: 09/07/2009  
 Profundidad: No Indica. Hora Muestreo: No Indica.  
 Muestreado por: Jhonny Gómez. Fecha Recepción: 09/07/2009

Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	Especificación	Resultados
<b>GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL</b>				
75,2 mm (3")	T11 - T27	20-07-09		100
50,2 mm (2")				100
38,1 mm (1 1/2")			100	100
25,4 mm (1")			70-100	91
19,0 mm (3/4")			60-90	82
9,5 mm (3/8")			45-75	61
No. 4 (4,75 mm)			35-60	45
No. 10 (2,00 mm)			25-50	34
No. 40 (425 µm)			10-30	13
No. 200 (75 µm)			5-15	4,5

<b>CONSTANTES DEL AGREGADO</b>				
Límite Líquido, %	T 89	21-07-09	25 máx.	N.P.
Límite Plástico, %	T 90		-	N.P.
Índice de Plasticidad, %	-	21-07-09	6 máx.	N.P.
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)		-	A-1-a (0)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487	-	-	GP

<b>RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD</b>				
Densidad Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	T 160-C	21-07-09	-	2232
Humedad Óptima, %	T 160-C	-	-	9

<b>CAPACIDAD DE SOPORTE</b>				
C.B.R., %	al 91%	T 193	23-07-09	-
	al 95%	T 193		80 mín.

<b>FRACCIÓN GRUESA</b>				
Índice de Durabilidad, %	T 210	-	-	-
Abrasión de los Ángeles, %	T-96	-	-	-
Caras Fracturadas, 1 o más caras	ASTM D-5821	-	-	-
Caras Fracturadas, 2 o más caras		-	-	-

**COMENTARIOS:**  
 \* Especificación según Licitación Pública 2008LN-000019-32700  
 Los resultados deberán compararse con las especificaciones del proyecto.  
 El valor reportado en el paréntesis en la Clasificación AASHTO, corresponde al índice de grupo.  
 Las celdas sombreadas indican incumplimiento de las Especificaciones.  
 Muestra entregada por el Sr. Jhonny Gómez.






Anthony Barquero Hernández (Supervisor de Procesos)      Ing. Marcia Durán Villalobos (Sub - Jefe de Laboratorio)

La reproducción parcial o total de este informe no podrá realizarse sin la aprobación escrita del Departamento de Materiales (Sub-Dirección). Los resultados incluidos en este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada.



**Informe de Ensayos en Sub-Base Expuesta**

**Información General:**

Programa MOPT-KFW. Dependencia Ejecutora. Informe Número **SBE-E-10-025**  
 Proyecto: Camino 1-03-066, Servicentro La Fila - El Rosario. Fecha Impresión 18/02/2010  
 Solicitado por: Ing. José Jiménez.  
 Oficio: Sin Oficio

**Descripción de la muestra:**

Fuente de Materiales: Tajo Santa Ana. Muestra Número: IM-SBE-10-026  
 Ubicación de la Muestra: Estación 0+720 Fecha Muestreo: 20/01/2010  
 Profundidad: No Indica. Hora Muestreo: 01:20 p.m.  
 Muestreado por: Anthony Barquero. Fecha Recepción: 20/01/2010

Ensayo	Método AASHTO	Fecha de Ensayo	* Especificación	Resultados
<b>GRADUACIÓN - PORCENTAJE PASANDO TOTAL</b>				
76,2 mm (3")	T 27	28-01-10	-	100
50,2 mm (2")			-	100
38,1 mm (1 1/2")			100	100
25,4 mm (1")			75 - 95	100
19,0 mm (3/4")			-	92
9,5 mm (3/8")			-	77
No. 4 (4.75 mm)			30 - 60	63
No. 10 (2,00 mm)			-	55
No. 40 (425 µm)	T 11	28-01-10	10 - 35	26
No. 200 (75 µm)			2 - 15	12
<b>CONSTANTES DEL AGREGADO</b>				
Límite Líquido, %	T 89	02-02-10	35 máx.	N.P.
Límite Plástico, %	T 90		-	N.P.
Índice de Plasticidad, %	-		4-10	N.P. **
Clasificación AASHTO	M-145-91(2000)	02-02-10	-	A-1-b (0)
Clasificación SUCS	ASTM D-2487		-	SM
<b>RELACIONES DE HUMEDAD-DENSIDAD</b>				
Densidad Máxima (kg/m <sup>3</sup> )	T 180-C	02-02-10	-	1635
Humedad Óptima, %	T 180-C	-	-	21
<b>CAPACIDAD DE SOPORTE</b>				
C.B.R., %	al 91%	T 193	11-02-10	40
	al 95%	T 193		30 mín.
<b>FRACCIÓN GRUESA</b>				
Índice de Durabilidad, %	T 210	-	-	-
Abrasión de los Ángeles, %	T-96	-	-	-
Caras Fracturadas, 1 o más caras	ASTM D-5821	08-02-10	50 mín.	100
Caras Fracturadas, 2 o más caras			-	100

**COMENTARIOS:**

\* Especificación según Licitación Abreviada 2009LA-000189-33300.  
 \*\*Según especificación, se podrán utilizar materiales con Índice de plasticidad menor a 4, en cuyo caso el contratista deberá asegurar que el material granular retenido en el tamiz #4, tenga al menos un 50% de una o más caras fracturadas.  
 El valor reportado en el paréntesis en la Clasificación AASHTO, corresponde al índice de grupo.  
 Los resultados deberán compararse con las especificaciones del proyecto.  
 Las celdas sombreadas indican incumplimiento de las Especificaciones.  
 Muestra entregada por el Señor Anthony Barquero.

ORIGINAL FIRMADO  
*Anthony Barquero H.*  
 Anthony Barquero Hernández  
 (Supervisor de Procesos)



Ing. Marcia Durán Villalobos  
 Original Firmado  
 Ing. Marcia Durán Villalobos  
 (Sub-Jefe de Laboratorio)



La reproducción parcial o total de este informe no podrá realizarse sin la aprobación escrita del Departamento de Materiales (Laboratorio). Los resultados incluidos en este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada.

## Anexo 2

15 de julio del 2010  
DI1580710

Señor  
Hugo Navarro Serrano  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
PRESENTE

Estimado Señor:

Le remito la información que usted solicitara a esta oficina por medio de su contrato con fecha 7 de junio del 2010.

Los datos recabados son: Totales mensuales de lluvia en milímetros ( un milímetro equivale a un litro de agua por metro cuadrado).

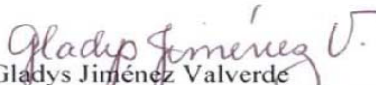
La ubicación geográfica de las estaciones consultadas son las siguientes:

ESTACION	LATITUD N	LONGITUD O	ELEVACIÓN (m)	PERIODO
TECNOLÓGICO	09°51'	83°54'	1395	1997-2008
PARAISO	09°49'	83°52'	1380	1953-2008
NAVARRO	09°48'	83°52'	1100	1969-2008
DULCE NOMBRE	09°50'	83°54'	1345	1997-2008
AGUA CALIENTE	09°50'	83°55'	1325	1966-1982

Es nuestro deseo haber satisfecho su solicitud y a la espera de recibir la respectiva copia de su investigación, según compromiso adquirido por Usted a través de la firma del contrato, así lo establece el artículo noveno donde indica: **“Que la parte contratante se compromete a suministrar al IMN una copia del trabajo o investigación donde fueron utilizado los datos o la información facilitada.”**

Esperando que la información le sea de gran ayuda y que los resultados en su análisis sean satisfactorios, se suscribe de Usted.

Atentamente,

  
Gladys Jiménez Valverde  
DEPARTAMENTO DE INFORMACION

/jaml



Ministerio del Ambiente y Energía

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL  
 Sistema de Estaciones Meteorológicas Automáticas  
 RESUMEN MENSUAL DE PRECIPITACIÓN (mm) 7 a 7 h

CUENCA: 73 Rio Reventazon  
 ESTACION: 123 ITCR, CARTAGO  
 DEL: 01/01/1997 AL: 31/12/2008  
 Lat: 09°51' N Long: 83°54' O  
 Alt: 1395 m



AÑO/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ACUM. ANUAL
1997	3.5	26.6	24.9	7.1	152.3	234.1	121.0	169.7	237.2	294.3	268.5	65.1	1,154.4
1998	35.6	40.7	20.8	137.1	200.4	163.5	192.6	175.5	276.2	240.7	119.8	145.2	1,589.8
1999	180.8	105.6	6.9	44.8	172.6	224.4	76.1	238.9	366.4	372.6	103.3	191.9	1,947.3
2000	65.4	61.1	4.3	62.8	77.6	157.2	100.9	101.4	56.9	92.3	136.0	67.3	1,289.2
2001	105.1	39.6	14.6	5.2	308.8	166.0	94.0	171.2	141.4	91.2	206.0	86.7	1,219.5
2002	75.9	0.0	51.3	41.8	275.3	364.2	112.6	174.5	112.5	116.7	248.5	20.9	1,252.6
2003	40.9	59.2	68.2	30.7	292.5	108.2	102.6	103.3	333.0	113.4	267.4	85.2	1,608.2
2004	135.1	39.4	4.3	32.4	86.3	247.0	207.5	178.4	236.9	367.6	161.7	37.6	1,734.3
2005	115.4	57.8	55.9	9.2	134.8	200.3	231.1	115.2	200.0	181.8	99.4	55.4	1,486.2
2006	40.5	37.2	23.7	62.9	285.0	50.0	127.7	259.8	141.0	255.1	144.4	168.3	1,595.6
2007	83.8	15.4	10.0	31.1	305.1	108.0	137.2	174.2	278.0	382.8	195.8	57.1	1,779.6
2008	80.6	44.0	24.9	43.2	208.1	178.4	138.6	159.6	222.2	238.3	166.2	94.9	1,589.0
MIN:	4.9	0.0	4.3	5.2	77.9	50.0	76.6	54.8	56.9	89.7	55.7	33.5	0.0
MAX:	180.8	105.7	68.2	137.0	308.7	384.3	244.1	257.6	365.2	382.8	268.4	191.9	384.3
DS:	50.7	27.7	21.4	37.4	88.8	91.6	52.8	57.6	93.3	116.8	69.2	54.0	

9 ó BLANCO: Ausencia de dato    PRO: Promedio    DS: Desviación Estándar    ACUM: Acumulado



R\_PROM\_MAXMIN  
 INFORMA

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL  
 Sistema de Estaciones Meteorológicas Automáticas  
 Promedios Temperatura Mínima y Máxima Mensual (°C)

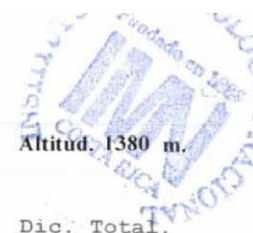
Pag. 1 de 1  
 16/07/2010  
 10:10 AM

CUENCA: 73 Rio Reventazon Lat: 09°51' N  
 ESTACION: 123 ITCR, CARTAGO Long: 83°54' O  
 DEL: 01/01/1997 AL: 31/12/2008 Alt: 1395 m

AÑO	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN		JUL		AGO		SET		OCT		NOV		DIC		PROMEDIOS	MIN	MAX
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX					
1997														168	235	161	238	160	248	165	246	163	240	144	226	160	239
1998	13.3	23.1	15.4	25.7	15.0	24.8	15.6	25.3	16.5	25.4	16.7	24.5	15.8	24.2	16.0	24.2	16.1	25.5	16.6	24.5	15.6	23.2	15.4	21.8	15.7	24.3	
1999	13.7	22.1	13.3	22.0	13.4	23.0	14.4	24.0	15.5	24.6	15.5	23.9	15.1	23.5	15.1	24.4	15.5	25.0	15.5	24.0	15.0	22.9	14.2	20.0	14.7	23.3	
2000	13.1	20.4	13.0	21.0	13.3	22.9	14.5	23.6	15.8	24.8	15.9	24.0	15.2	23.4	15.5	24.0	15.4	24.8	15.4	23.8	14.8	23.2	13.9	22.1	14.6	23.2	
2001	13.0	21.0	12.9	21.8	13.7	23.7	14.5	23.6	15.4	25.4	15.7	23.8	15.2	23.5	15.8	24.2	15.4	24.7	16.0	25.2	15.9	22.3	15.0	23.0	14.9	23.5	
2002	13.9	22.1	13.1	22.6	13.9	23.5	13.8	23.9	16.3	24.3	16.2	24.9	16.1	23.5	15.9	23.7	15.8	25.3	15.3	24.5	15.0	22.5	14.3	22.6	15.0	23.6	
2003	13.8	22.0	13.7	23.0	14.6	24.9	15.2	25.2	16.1	25.0	15.8	25.2	15.9	23.8	15.7	24.4	15.4	25.9	16.1	25.2	15.8	24.4	15.0	21.8	15.3	24.2	
2004	13.8	22.4	13.4	23.3	14.2	22.6	15.2	24.3	16.2	23.9	15.5	24.4	15.3	24.0	15.5	24.9	15.1	25.9	15.4	25.4	14.9	23.3	13.7	21.9	14.8	23.9	
2005	13.8	20.6	13.1	22.2	15.2	26.1	15.4	24.9	16.5	26.7	16.4	26.7	15.8	25.5	15.6	24.9	16.1	25.4	16.3	24.5	15.3	22.9	13.5	23.5	15.3	24.5	
2006	13.8	22.3	13.2	22.4	13.8	23.3	14.4	25.2	15.5	26.0	16.3	25.7	16.0	24.9	16.0	25.1	15.1	25.5	16.0	25.6	15.0	23.4	15.0	23.5	15.0	24.4	
2007	13.9	22.4	12.9	24.1	13.9	24.2	15.2	25.3	16.3	25.2	15.9	24.9	15.6	23.9	15.4	24.8	15.3	24.7	15.6	24.1	15.0	22.0	13.5	21.2	14.9	23.9	
2008	12.8	21.7	12.8	22.1	12.9	23.5	14.5	24.4	15.3	25.0	15.3	24.4	15.4	23.3	15.4	24.3	15.7	25.1	15.7	24.0	14.9	22.0	13.9	21.5	14.6	23.4	
PRO:	13.5	21.8	13.4	22.7	14.0	23.9	14.8	24.5	16.0	25.1	15.9	24.8	15.7	23.9	15.7	24.4	15.6	25.2	15.9	24.6	15.3	23.0	14.3	22.1	15.0	23.8	
DS:	0.4	0.8	0.7	1.3	0.7	1.0	0.5	0.7	0.5	0.8	0.4	0.8	0.5	0.7	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.6	1.0			

9/6 BLANCO: Ausencia de dato  
 PRO: Promedio  
 DS: Desviación Estandar

**Instituto Meteorológico Nacional**  
Resumen Mensual de Precipitación



073 024 PARAISO, LOS NARANJOS      Latitud: 09 ° 49 ' N Longitud: 83 ° 52 ' O      Altitud: 1380 m.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total.
1953					221.2	236.9	84.4	108.1	106	113.9	69.8	103.3	1043.6
1954	189.4	24.9	70.3	78.4	156.5	250.6	152.5	121	145.2	349.6	179	175.3	1892.7
1955	69.7	69.3	19.2	31.2	163	176.1	354	146.5	215	509	150	183	2086.0
1956	150	50	34.5	57.5	261.5	226.5	281.5	130	226	159	140.5	216.5	1933.5
1957	93	27.5	80.5	15	204	130	202.5	99	210	265.5	150.5	129.5	1607.0
1958	70	94.5	45.5	16	304	192	86.5	89.5	74.5	68.5	82	61.5	1184.5
1959	50	51.5	12.5	83.5	122.5	222	117.5	179.5	109.5	309	136	52.5	1446.0
1960	105.5	48.5	28.5	34	154.5	184.5	156.5	210	134.5	238	87	111.5	1493.0
1961	82.5	11.5	24	24	113.5	192.5	192	89.5	279	176	166	76.5	1427.0
1962	68	17.5	20	91	143.5	177.5	205	150.5	259.5	301	212	110	1755.5
1963	75.5	44	82.5	179	114.5	187.5	98.5	168	232.5	163	173.5	188	1706.5
1964	23.5	3	11.5	72	98.5	307.5	224	164	172	221.5	145	69	1511.5
1965	161.5	77.5	54	9	256						161.5	140.5	860.0
1966	124.5	144.5	37.5	82.5	262.5	329	210	150	239.5	101	79.5	253	2013.5
1967	135	43.5	43	128.5	76.5	358.5	181	211	315	184	116.5	67.5	1860.0
1968	68	107	99.5	45	246	134.5	319.5	226.5	322	233	166	67.5	2034.5
1969	38	26		61	76.5	214.5	99.5	234.5	238.5	168	250.5	187	1594.0
1970	55.5	48.5	86.5	192.5	123	124	143.2	125.5	224.5	164	273	512.5	2072.7
1971	95	52			169	185	212.5						713.5
1975						317.7	321.1	634.1	737	651.8	486.8	534.2	3682.7
1976	132.8	39.6	3.4	168.1	233.3	297.2	314.4	189.2	237.9	196.5	40.2	66.8	1919.4
1977	0	2.3	0	0	214.5	139.1	219.6	353.4	187.7	206	72.4	117.3	1512.3
1978	47.7	22.7	11.3	13	256.3	213.5	149.3	155.5	252.6	166.6	210.3	116.8	1615.6
1979	0	8.6	14.4	188.4	97.7	202.1	170.4	231.6	295.1	287.2	108.4	98.1	1702.0
1980	0	96.8	12.9	37.1	245.9		146.9	160.2	271.4	186.1	107	205.5	1469.8
1981	140.7	85.9	86.6	111.8	232.6	260.1	133.9	372.5	162	266	203.6	76	2131.7
1982	62.6	20.1	36.3	7.7	344.2	233.8	275.6	134.9	183	376.7	127.3	33.4	1835.6
1983	54.1		147.8		232.4	166.6	137.6	176.5	247.2	279.5	126.4	42	1610.1
1984	67.3	53.9	5.6	8.9	236.3	177.5	269.6	428.5	365.1	134.4	132.7	360.9	2240.7
1985	34	75.5	26.4	31.3	137.1		138.6	185.8	229.9	159.8	84.8	68.6	1171.8
1986	61.6	11.1	121.3	58	97.9	205.6	124.1	207.4	196.8	196.7	43	41.1	1364.6
1987	61.5	13.1	24.5	117.2	96	185.8	227	236.4	181.5	291	25.9	116.7	1576.6
1988	120.8	147.4	122.1	127.5	282.1	207.1	283.8	573.7	402.8	146.7	46	153.9	2613.9
1989	60.7	81	43.9	60	139.7	158.4	177.6	181.3	361.5	170.2	124	133.1	1691.4
1990	96.8	15.8	98.9	25	284.7	233.2	167.5	223.6	234.8	399.7	139.9	256.1	2176.0
1991	43.5	3.5	9.4	50.5	77.5	250.1	176.3	157.6	72.2	62.5	58.6	133.6	1095.3
1992	25.2	9	28	48.3	104	203.7	233.9	117.1	374.9	103.9	69.8	182.9	1500.7
1993	84.3	38.1	42	53.4	256.4	270.9	111.7	145.7	237.7	90.2	49	192.2	1571.6
1994	9.3	29.6	25.5	71	157	92.4	137.3	289.2	212.1	291.4	174.4	239.7	1728.9
1995	22.5	23.6	41.5	79	153.4	217.7	131.8	200.1	327.9	330.2	83.9	35.5	1647.1
1996	63.6	189	37	9.8	263.2	128.6	226.3	184.2	194.3	140.1	165.5	164	1765.6
1997	47.4	156.5	80.2	147.9	202.4	175.6	236	203.1	195.4	341.3	333.6	81.9	2201.3
1998	15.8	36.3	33.4	13.3	117.7	298.3	260.5	180.4	305.1	304.9	114.4	186.7	1866.8
1999	54.7	103.3	41.2	160.6	256.1	187.3	154.5	283.8	378.7	337.3	156.9	330.6	2445.0
2000	385.6	99.4	226.7	99.4	227.2	255.7	204.7	230.9	308.8	166.1	168.4	92.7	2465.6
2001	72.7	102.1	9.7	180.2	97.1	217.9	153.7	253.4	169.6	97.1	187.2	157.2	1697.9

aplic:tot\_mes\_preci.rdf

**Instituto Meteorológico Nacional**  
Resumen Mensual de Precipitación

073 024 PARAISO, LOS NARANJOS      Latitud: 09 ° 49 ' N Longitud: 83 ° 52 ' O      Altitud. 1380 m.

Año													
2002	101.1		30.1	10.9	420.4	193.8	149.3	390.4	273.2	142.8	374.8	21.3	2108.1
2003	109.8	22.6								385.7	114		632.1
2004	76.4	76.6	102.5	36.5	291	114.5	147.7	142.7		111.5	206.1	184.3	1489.8
2005	174.2	83.3	24.5	54.2	35.2	384.1	248.5	191.6		265.1	145	55.6	1661.3
2006	241.9	97.1	110.1	25.5	100.8	265	143.6	118.5	158	192.1	149.1	110	1711.7
2007	111.9	49.2	37.9	53.7	290.9	105.4	181.2	295.4	240.3	267.9	199.4	266.9	2100.1
2008	92.2	38.5	.4	65	348.4	189.6		226.1	182.8	326.7	214.1	126.7	1810.5
Prom.	84.8	56.6	49.7	69.0	192.1	211.8	189.5	213.2	243.3	231.3	149.6	150.7	1841.7 *
D. S.	66.0	44.0	45.1	54.7	85.2	64.3	65.8	110.3	106.4	114.2	84.8	107.5	948.2 *
Min.	0	2.3	0	0	35.2	92.4	84.4	89.5	72.2	62.5	25.9	21.3	
Max.	385.6	189	226.7	192.5	420.4	384.1	354	634.1	737	651.8	486.8	534.2	

Espacio en blanco = ausencia de dato

\* = suma de promedios





**Instituto Meteorológico Nacional**  
Resumen Mensual de Precipitación



073 035 NAVARRO, CARTAGO

Latitud: 09 ° 48 ' N Longitud: 83 ° 52 ' O

Altitud: 1100 m.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1969	41	1	.5	54	88	256.5	101	280	230	198	232	179	1661.0
1970	46.5	0			195.5	200	170.5	287.5	233.5	210	218.5	622	2184.0
1971	32.5	32	5.5	39	221.5	230.5	279	193	247	485	31.5	0	1796.5
1972	23.9	0	256	5.4	177.5			244	323.2	372	81	171	1654.0
1974	110	3.9					82	157					352.9
1975	44				26								70.0
1976									209.4	136	176.8	81.7	603.9
1977	22.6	8.3	36.7	27.4	168.8	269.7	160.6	297.3	236.6	128.8	122.7	9	1488.5
1978	7	11	30	16.3	249.1	133.5	185.9	238.9	292.4	123	2	118.2	1407.3
1979	0	0	0	217.2	103	200.1	173.2	218.6	210.2	228.8	118	55.2	1524.3
1980	37	76.4	9	20	341.2	314	228.9	40	474.5	177			1718.0
1981	0	84	109	9.6	83	83	63	252.6	340.5	218.6	246.9	84.2	1574.4
1982	0	1.3	10.7	.7	296.7	358.6	439.5	52.3	215.4		181	105.5	1661.7
1983	25.6		44.5	0	199.8	142.8	124.8	172.7	294.5	224.6	118.7	43.7	1391.7
1984	39.4	17.8	23.7	0	226.5	159.9	126.7	232.1	456.2	144.4	56.4		1483.1
1985	0	0	9	11.6	129.6	312	213.5	160.8	134.2	142.6	139.7	140.5	1393.5
1986	0	0	0	0	203.9	229.9	338.3	260.5	334.3	180.7	44.6	21.3	1613.5
1987	94.3	0	12.2	217.6	99.2	282.9	283	328.7	151.8	437.5	25.3		1932.5
1988	80.7	82.1	65.3	16.2	159.3	278	249.4	521.3	377.7	292.8	82.3	79.9	2285.0
1989	84.2	19	16.9	34.9	128.1	200.9	269.1	208.4	362.6	112.4	132.7	93.4	1662.6
1990	66	.2				207.4	173.7	183.5	273.9			61.5	966.2
1991	28.6	45.1	14.4	15	172.4	232.3	220.9	224.4	185.4	290.3	134.5	5.6	1568.9
1992	0	92.7	32.1	75.2	62.1	211	309.6	145.4	349.7	149.1	67.3	181.7	1675.9
1993	98.3	0	47	55.5	297.8	373.6	137.3	187.3	291	148	21.5	95.1	1752.4
1994	69.2	14.2	43	79.6	251.8	138.6	254.5	324.4	360.5	185.2	178.4	181.7	2081.1
1995	27.3	8.5	24.5	150.9	104	277.9	245.6	205.9	357	340.3	105.4	32.8	1880.1
1996	66.4	169	2.7	26.7	378.5	211.1	149.8	123.5	143.5	142.7	214.4	108	1736.3
1997		140.6	56.7	63.3	268.6	220	93.2	257.9	222.6	411.3	234.6	57.4	2026.2
1998	3.8	14.9	52.7	20.4	120.5	327.9	388.3	255.8	286.7	270.8	194.3	342.1	2278.2
1999	56.9	103.9	53.2	164.9	196.3	230.8	167.1	386.8	422.1	348.9	149.8	206.5	2487.2
2000	250.5	90	19.7	79.8	217.7	247.4	209.6	97.4	255	194.1	143.1	98.9	1903.2
2001	101.6	113.3	10.1	144	172.1	172.3	166.8	315	148.4	136.2	178.6	141.5	1799.9
2002	75.6	41.2	15.5	18.7	362.8	190.8	241	461.3	306.3	181.8	391.8	18.1	2304.9
2003	82.3	31.4	213	51.6	311.1	400.6	175.5	105.9	368.3	403.6	157.3	161.7	2462.3
2004	64.2	50.1	83	36.1	338.7	158.9	171.3	169.4	295.7	128.5	299.3	134.4	1929.6
2005	213.9	79.6	33.6	53.8	117.9	423.8	231.5	256.2	259.7	260.1	142.8	62.8	2135.7
2006	265	76.8	75.3	23	118	354.2	238.2	134.6	202.1	254.3	204.9	70.1	2016.5
2007	85.2	19.9	24.8	99.5	418.5	165.6	296.9	491.6	332.5	408.3	215.2	303.8	2861.8
2008	72.4	49.6	29.9	69.9	339.6	233.9	283	367.6	268	345.3	279.7	112.4	2451.3
Prom.	62.6	41.1	42.9	55.8	204.0	240.9	212.3	238.9	282.5	240.3	152.1	123.0	1896.4 *
D. S.	64.0	45.5	55.2	59.3	99.4	80.1	83.6	110.5	84.6	105.9	86.0	117.6	991.7 *
Min.	0	0	0	0	26	83	63	40	134.2	112.4	2	0	
Max.	265	169	256	217.6	418.5	423.8	439.5	521.3	474.5	485	391.8	622	

Espacio en blanco = ausencia de dato

aplic:tot\_mes\_preci.rdf



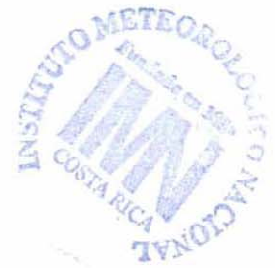
Instituto Meteorológico Nacional  
Resumen Mensual de Precipitación

073 035 NAVARRO, CARTAGO

Latitud: 09 ° 48 ' N Longitud: 83 ° 52 ' O Altitud. 1100 m.

*Espacio en blanco = ausencia de dato*

\* = suma de promedios



**Instituto Meteorológico Nacional**  
Resumen Mensual de Precipitación

073 048 DULCE NOMBRE

Latitud: 09 ° 50 ' N Longitud: 83 ° 54 ' O Altitud. 1345 m.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total.
1997	47	125.1	41.5	133.6	217.9	217.9	156.1	189.8	187.3	295.9	337.9	61.2	2011.2
1998	7.2	19.7	19.6	11.9	118.4	250.9	208.7	203.1	291.1	264.9	113.9	161.3	1670.7
1999	38.1	42.8	24.1	140.3	221.8	152.4	105.8	240.8	412.1	384.4	80.4	214.6	2057.6
2000	238.5	108.6	10.6	56.5	241.3	286.3	133.6	142.1	299.5	149.5	147.9	59.9	1874.3
2001	69.4	79.2	5.8	88.4	86.4	184.7	110.3	222.9	151.4	96.5	164	103.1	1362.1
2002	102.5	38.3	17.7	7.6	393.7	195.8	118.4	274.5	221.6	125.6	264.8	20	1780.5
2003	63.3	18.6	65.8	65	244.2	429.5	109.2	63.9	273.5	395.1	65.9	137.5	1931.5
2004	50	61.8	85.5	22.7	283	108.3	128.4	106.1	429.4	155.7	260.7	92.5	1784.1
2005	121.3	42.5	11.8	31.1	71.8	225.7	186.4	169.2	238.7	355.2	165.1	33.3	1652.1
2006	134.9	56.1	65.1	5.3	117.2	237.7	242.6	119.7	227.1	188.4	104	64.7	1562.8
2007	47.5	30.4	25.4	59.7	273.9	59.2	134.8	275.4	149	298.8	123.4	126	1603.5
2008	58.4	19.3	10	28.9	317.1	129.4	190.4	220.9	273.9	424.7	216.3	99.3	1988.6
Prom.	81.5	53.5	31.9	54.3	215.6	206.5	152.1	185.7	262.9	261.2	170.4	97.8	1773.2 *
D.S.	61.3	34.9	26.4	46.3	99.1	95.5	44.8	67.2	89.0	115.1	83.5	55.8	818.8 *
Min.	7.2	18.6	5.8	5.3	71.8	59.2	105.8	63.9	149	96.5	65.9	20	
Max.	238.5	125.1	85.5	140.3	393.7	429.5	242.6	275.4	429.4	424.7	337.9	214.6	

Espacio en blanco = ausencia de dato

\* = suma de promedios



*Media mensual en función a valores horarios*

73 048 DULCE NOMBRE	Lat. 9 ° 50 ' 19 '' N Long. 83 ° 54 ' 26 '' O Alt. 1345 m												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Pro.
<b>1997</b>	18.0	17.9	18.3	19.6	19.6	20.2	20.5	20.1	19.5	19.6	19.5	18.7	19.3
<b>1998</b>	18.2	21.0	20.6	19.5	20.9	19.6	19.5	19.8	19.6	20.4	19.6	18.7	19.8
<b>1999</b>	17.5	17.0	17.5	18.8	19.3	18.7	18.5	19.1	18.8	18.4	18.2	16.7	18.2
<b>2000</b>	16.5	16.9	18.0	18.5	19.8	19.4	18.9	19.1	18.3	18.2	16.8	17.3	18.1
<b>2001</b>	16.7	17.0	18.6	17.8	18.5	17.9	17.2	17.6	18.7	19.3	19.0	18.4	18.0
<b>2002</b>	17.7	17.5	18.0	18.9	19.9	19.3	18.9	18.6	19.5	18.9	18.2	18.3	18.6
<b>2003</b>	17.6	18.0	19.3	19.7	19.2	19.4	19.3	19.4	19.9	20.0	19.1	17.9	19.1
<b>2004</b>	18.2	18.2	17.3	19.5	19.2	19.3	18.7	19.3	19.6	19.5	17.6	17.1	18.6
<b>2005</b>	17.4	16.7	18.7	19.4	20.3	20.1	19.1	18.7	19.1	19.6	18.5	18.4	18.8
<b>2006</b>	18.1	17.8	17.5	18.8	19.3	19.8	19.2	19.3	19.3	19.8	18.2	18.6	18.8
<b>2007</b>	17.6	18.6	19.1	19.1			18.6	19.1	19.1	18.9	17.4	16.8	18.4
<b>2008</b>	16.9	17.4	17.8	19.0	20.0	19.7	19.4	19.6	19.8	19.8	18.2	17.6	18.8
<b>Pro.</b>	17.5	17.8	18.4	19.1	19.6	19.4	19.0	19.1	19.3	19.4	18.4	17.9	

**Instituto Meteorológico Nacional**  
Resumen Mensual de Precipitación

073 076 INCSA, AGUACALIENTE

Latitud: 09 ° 50 ' N Longitud: 83 ° 55 ' O Altitud. 1325 m.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total.
1966	147.6	160.3	88.8	190.7	619.6	497.5	190.4	219.9	331.6	214.9	117.3	447.6	3226.2
1967	289.6	98.5	96.5	264.2	119.6	548.8	320.9	291.5	383.8	272.4	168.6	68.6	2923.0
1968	152.5	191	151.5	21.6	423.3	211.5	568.1	357	590.5	408.6	276.1	157.7	3509.4
1969	0	77.9	16.7	68.6	139.5	426.9	147.3	501.9	373.6	210.8	246	158.7	2367.5
1970	62.6	86.8	14.1	203.6	294.3	127.7	193.2	179.1	456.9	153	164.4	608	2543.7
1971	97.6	48.4	43.9	93.2	224.4	209.6	247.3	251.5	339.8	447.9	97.2	40.1	2140.9
1972	117.3	120.1	25.5	93.7	343.1	193.9	100	275.7	342.2	550.7	119.1	195.5	2476.0
1973	106.1	54.7	12.5	37	515.6	366.9	299.9	307.7	182.4	567.9	203.7	195.2	2849.6
1974	184.5	75	20.1	22.7	449.2	225.7	195.2	257.8	398.2	283.4	35.4	151.4	2298.6
1975	84.7	7.5	6.3	3.6	119.7	102.1	75.5	268	318.1	121	201.1	101.6	1409.2
1976	27.8	21.6	2.5	31.6	113.8	201.9	93.3	25.8	81.9	66.6	34	0	700.5
1977	22.7	10.9	6.6	65.8	11.3	159.2	201.4	273.8	288	139	88.7	3.4	1268.8
1978	18.5	90.8	8	9	216.5	82	129.6	129.5	389	219.6	191.7	71.6	1555.8
1979	0	0	3.5	217.8	13.8	170.9	117.4	246.1	332.9	162.9	112	54.3	1656.5
1980	106.1	13.2	0	17.5	160.8	430.5	98.1	82.9	152.8	72.5	168.3	119.9	1522.6
1981	63.7	23.3	58.1	128	191.5	394.8	129.7	340.6	192.8	250.7	195.4	50	2018.6
1982	4	0	0	0	254.5	204.7				298.9	85.5	2	849.6
Prom.	87.4	63.5	32.6	86.4	260.9	267.7	194.2	250.6	322.2	267.1	147.3	142.7	2122.6 *
D.S.	77.4	56.9	42.7	64.7	162.9	144.7	123.5	112.1	124.3	150.5	68.9	161.0	1309.5 *
Min.	0	0	0	0	11.3	82	75.5	25.8	81.9	66.6	34	0	
Max.	289.6	191	151.5	264.2	619.6	548.8	568.1	501.9	590.5	567.9	276.1	608	

Espacio en blanco = ausencia de dato

\* = suma de promedios



## Anexo 3

**Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples,  $P_t = 2,0$**

Carga p/eje (kips) <sup>6</sup>	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

**Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2,0**

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3



**Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 2,0**

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

## Anexo 4





Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

LANAMME

## Certificado de calibración

Nombre del cliente:	Laboratorio de Materiales del MOPT
Domicilio:	Plaza González Víquez, San José.
No. de certificado:	I-0947-08
Fecha de calibración:	14 de noviembre de 2008
Instrumento:	Anillo de carga Mopt-fuer-003
Marca:	Humboldt
Modelo:	H-4454A
No. de serie:	1130
Alcance de calibración:	50 kN
Alcance máximo:	50 kN
Resultados de la calibración:	Anexo de la página 3 a la página 6
Incertidumbre:	Se informa en el punto 5 de la página 6 del anexo
Patrón utilizado:	Anillo de carga, marca ELE, número de serie 0125-12-1056 Trazabilidad: CENAM CNM-CC-720-323/2008
Condiciones ambientales:	Temperatura en (°C) = (23,0 ± 0,3) °C
Procedimiento utilizado:	Comparación directa IT-LF-02 (Procedimiento no acreditado)

(1) Las aclaraciones indicadas al reverso de esta hoja forman parte de este certificado

Calibró:

Ing. Humberto Tioli Mora  
Jefe Laboratorio de Fuerza

Aprobó:

Ing. Guillermo González Bellar  
Director a.i. Lanamme UGR



Página 1 de 6

## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

FECHA CALIBRACION:	14 de noviembre de 2008	No. INFORME: I-0947-08
NOMBRE CLIENTE:	Laboratorio de Materiales del MOPT	
DOMICILIO:	Plaza González Víquez, San José	
CONDICIONES AMBIENTALES:	TEMPERATURA: 23,0 ± 0,3 °C	HUMEDAD RELATIVA: 69%
<i>(± x, x representa la variación máxima durante la calibración)</i>		

### 1- DATOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CALIBRACION

EQUIPO BAJO PRUEBA:	Anillo de carga Mopt-fuer-003	ALCANCE CALIBRACION:	50	kN
MARCA:	Humboldt	INDICADOR:	analógico	
MODELO:	H4454A	MARCA:	Humboldt	
SERIE No:	1130	SERIE:	3350221	
ALCANCE MEDICION:	50 kN	MODELO:	EDP 2201C-HUM	
MODO DE OPERACIÓN:	Compresión	PRECISION:	1 div	
OBSERVACIONES:	RESOLUCION: 0,25 div			
Se calibra solo en ascenso, pues el cliente indica que no se utiliza en descenso.				

EQUIPO DE REFERENCIA:	Anillo de carga	INDICADOR:	ANALOGICOS	
MARCA:	ELE	MARCA:	ELE	
MODELO:	59315/1999	MODELO:	NP	
SERIE No:	0125-12-1056	MATRICULA No:	NA	
ALCANCE MEDICION:	50 kN	RESOLUCION:	0,250 DIV	
INCERTIDUMBRE (% L):	0,29 %	PRECISION:	NA	
FACTOR DE COBERTURA:	k=2			
TRAZABILIDAD:	CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA	CENAM - MEXICO		
No CERTIFICADO:	CNM-CC-720-323/2008			
OBSERVACIONES:				

### 2- RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

El instrumento de referencia (anillo) es instalado en la mesa de aplicación de carga de la máquina de ensayos. Ha permanecido en el sitio por un período mínimo de 12 horas para su ambientación antes del inicio de la toma de datos para la calibración. Se realizan pruebas preliminares de funcionamiento al equipo por calibrar. Se determina el alcance y se aplican fuerzas al 100 % del alcance de calibración (precargas) para la estabilización y acomodamiento de la estructura interna de los elementos. Luego se aplican las fuerzas en el sentido de la calibración (compresión) mediante el hidráulico de la cabeza de carga a cada división correspondiente a los puntos equidistantes previamente distribuidos dentro del alcance de calibración. Cada paso de carga del alcance de calibración es medido 3 veces en una misma posición de montaje de referencia (0°) y dos veces más en forma creciente y decreciente en las siguientes posiciones (120° y 240°)



I-0947-08 Laboratorio del MOPT-Anillo de carga Humboldt 50 kN-14nov2008.xls

## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

No. INFORME: I-0947-08

### 3- RESUMEN DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DEL EQUIPO BAJO CALIBRACION

COMPRESION				
Fuerza aplicada (kN)	Lectura promedio (divisiones)	U <sub>expandida</sub> K=2 ± (% L)	Error de indicación % L	Error residual <sup>1)</sup> % L
4,906	115,00	0,358	---	0,0008
9,786	228,90	0,322	---	0,0007
14,718	348,55	0,169	---	0,0006
19,624	465,20	0,359	---	0,0005
24,523	581,65	0,231	---	-0,0001
29,421	698,75	0,193	---	-0,0002
34,336	818,60	0,160	---	-0,0003
39,252	937,40	0,185	---	0,0011
44,160	1 055,80	0,134	---	0,0006
49,045	1 173,90	0,144	---	-0,0004

Nota 1: El error residual es debido al uso de la ecuación de mejor ajuste que se observa en el punto 4

### 4- ECUACION DE MEJOR AJUSTE PARA EL EQUIPO BAJO CALIBRACION

#### 4.1. Ecuación de mejor ajuste para obtener la fuerza en función de la lectura observada

$$F_i(L_i) = A + B(L_i) + C(L_i)^2 + D(L_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	A	B	C	D	Tipo de ecuación	
Compresión	-4,8090E-01	4,9642E-02	-2,7791E-05	3,0060E-08	cúbica	10 % al 40 %
Compresión	1,0739E+00	3,6269E-02	1,0945E-05	-6,8577E-09	cúbica	40 % al 70 %
Compresión	2,1278E+00	3,6189E-02	5,3284E-06	-1,7978E-09	cúbica	70 % al 100 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza pronóstico de la ecuación de mejor ajuste que se aplica al equipo bajo prueba, en

kN

$L_i$  es la lectura observada en el indicador del equipo a prueba, bajo una fuerza aplicada y se obtiene como:

$$L_i = (\text{Lectura bajo una fuerza aplicada} - \text{Lectura de cero, sin una fuerza aplicada})$$

#### 4.2. Ecuación de mejor ajuste para obtener la lectura en función de la lectura que se requiere aplicar

$$L_i(F_i) = a + b(F_i) + c(F_i)^2 + d(F_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	a	b	c	d	Tipo de ecuación	
Compresión	1,1891E+01	1,9386E+01	3,8018E-01	-9,7302E-03	Cuadrática	10 % al 40 %
Compresión	-2,7969E+01	2,7351E+01	-1,5940E-01	2,3555E-03	Cuadrática	40 % al 70 %
Compresión	-5,3274E+01	2,7293E+01	-7,6496E-02	6,152E-04	Cuadrática	70 % al 100 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza aplicada, en kN

$L_i$  es la lectura que deberá observarse en el indicador para obtener la fuerza  $F_i$  deseada.





Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

## Certificado de calibración

Nombre del cliente:	MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes)
Domicilio:	Plaza González Víquez, San José.
No. de certificado:	I-0226-09
Fecha de calibración:	16 de marzo de 2009
Instrumento:	Anillo de carga Mopt-fuer-003
Marca:	Humboldt
Modelo:	8H4454A
No. de serie:	1130
Alcance de calibración:	50,0 kN
Alcance máximo:	4,5 kN
Resultados de la calibración:	Anexo de la página 3 a la página 6
Incertidumbre:	Se informa en el punto 5 de la página 6 del anexo
Patrón utilizado:	Anillo de carga, marca ELE, número de serie 0119-13-1024 Trazabilidad: CENAM CNM-CC-720-325/2008
Condiciones ambientales:	Temperatura en (°C) = (21,4 ± 0,2) °C
Procedimiento utilizado:	Comparación directa IT-LF-02 (Procedimiento no acreditado)
Calibró:	Jonathan González

(1) Las aclaraciones indicadas al reverso de esta hoja forman parte de este certificado

Responsable de la calibración:

Ing. Humberto Tioli Mora  
Jefe Laboratorio de Fuerza

Aprobó:

Ing. Alejandro Navas Carro  
Director LanammeUCR





## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

FECHA CALIBRACION: 16 de marzo de 2009	No. INFORME: I-0226-09
NOMBRE CLIENTE: MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes)	
DOMICILIO: Plaza González Víquez, San José	
CONDICIONES AMBIENTALES: TEMPERATURA: ( 21,4 ± 0,2 ) °C	HUMEDAD RELATIVA: 64%
<i>( ± x, x representa la variación máxima durante la calibración )</i>	

### 1- DATOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CALIBRACION

EQUIPO BAJO PRUEBA: Anillo de carga Mopt-fuer-003	ALCANCE CALIBRACION: 4,5 kN
MARCA: Humboldt	INDICADOR: Analógico
MODELO: H4454A	MARCA: Humboldt
SERIE No: 1130	SERIE: 3350221
ALCANCE MEDICION: 50 kN	MODELO: EDP 2201C-HUM
MODO DE OPERACIÓN: Compresión	PRECISION: 1 div
OBSERVACIONES:	RESOLUCION: 0,25 div
Se calibra solo en ascenso, pues el cliente indica que no se utiliza en descenso.	

EQUIPO DE REFERENCIA: Anillo de carga	INDICADOR: ANALOGICO
MARCA: ELE	MARCA: ELE
MODELO: 59885/1999	MODELO: NP
SERIE No: 0119-13-1024	MATRICULA No: NA
ALCANCE MEDICION: 4,413 kN	RESOLUCION: 0,250 DIV
INCERTIDUMBRE (% L): 1,35 %	PRECISION: 1 DIV
FACTOR DE COBERTURA: k=2	
TRAZABILIDAD: CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA	CENAM - MEXICO
No CERTIFICADO: CNM-CC-720-325/2008	
OBSERVACIONES:	

### 2- RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

El instrumento de referencia (anillo) es instalado en la mesa de aplicación de carga de la máquina de ensayos. Ha permanecido en el sitio por un período mínimo de 12 horas para su ambientación antes del inicio de la toma de datos para la calibración. Se realizan pruebas preliminares de funcionamiento al equipo por calibrar. Se determina el alcance y se aplican fuerzas al 100 % del alcance de calibración (precargas) para la estabilización y acomodamiento de la estructura interna de los elementos. Luego se aplican las fuerzas en el sentido de la calibración (compresión) mediante el hidráulico de la cabeza de carga a cada división correspondiente a los puntos equidistantes previamente distribuidos dentro del alcance de calibración. Cada paso de carga del alcance de calibración es medido 3 veces en una misma posición de montaje de referencia (0°) y dos veces más en forma creciente y decreciente en las siguientes posiciones (120° y 240°).



I-0226-09 Laboratorio del MOPT-Anillo de carga Humboldt 50kN-16mar09.xls

## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

No. INFORME: I-0226-09

### 3- RESUMEN DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DEL EQUIPO BAJO CALIBRACION

COMPRESION				
Fuerza aplicada	Lectura promedio	U <sub>expandida</sub> K=2	Error de indicación	Error residual <sup>1)</sup>
(kN)	(divisiones)	± (% L)	% L	% L
0,490	10,75	5,455	---	-0,0193
0,981	21,75	2,665	---	0,3804
1,471	33,00	1,786	---	-0,1002
1,961	44,45	1,421	---	-0,6517
2,454	56,90	1,287	---	0,2786
2,941	68,90	1,069	---	0,4423
3,431	80,35	0,817	---	0,0119
3,926	91,50	0,710	---	-0,4550
4,413	103,05	0,721	---	0,1894

Nota 1: El error residual es debido al uso de la ecuación de mejor ajuste que se observa en el punto 4

### 4- ECUACION DE MEJOR AJUSTE PARA EL EQUIPO BAJO CALIBRACION

#### 4.1. Ecuación de mejor ajuste para obtener la fuerza en función de la lectura observada

$$F_i(L_i) = A + B(L_i) + C(L_i)^2 + D(L_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	A	B	C	D	Tipo de ecuación	
Compresión	-1,7032E-02	4,8494E-02	-1,2904E-04	7,4161E-07	cúbica	1 % al 9 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza pronóstico de la ecuación de mejor ajuste que se aplica al equipo bajo prueba, en kN

$L_i$  es la lectura observada en el indicador del equipo a prueba, bajo una fuerza aplicada y se obtiene como:

$$L_i = (\text{Lectura bajo una fuerza aplicada} - \text{Lectura de cero, sin una fuerza aplicada})$$

#### 4.2. Ecuación de mejor ajuste para obtener la lectura en función de la lectura que se requiere aplicar

$$L_i(F_i) = a + b(F_i) + c(F_i)^2 + d(F_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	a	b	c	d	Tipo de ecuación	
Compresión	5,2643E-01	2,0084E+01	1,7079E+00	-2,2768E-01	cúbica	1 % al 9 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza aplicada, en kN

$L_i$  es la lectura que deberá observarse en el indicador para obtener la fuerza  $F_i$  deseada.

I-0226-09 Laboratorio del MOPT-Anillo de carga Humboldt 50kN-16mar09.xls





Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

LanammeUCR


## Certificado de calibración

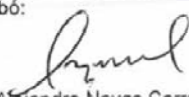
<b>Nombre del cliente:</b>	<b>Laboratorio de Materiales Ministerio de Obras Públicas y Transportes</b>
<b>Domicilio:</b>	<b>Plaza González Víquez, San José</b>
<b>No. de certificado:</b>	I-0206-10
<b>Fecha de calibración:</b>	19 de febrero de 2010
<b>Instrumento:</b>	Anillo de carga
<b>Marca:</b>	Humboldt
<b>Modelo:</b>	H4454
<b>No. de serie:</b>	1955
<b>Alcance de calibración:</b>	9,786 kN (2 200 lb <sub>f</sub> )
<b>Alcance máximo:</b>	9,786 kN (2 200 lb <sub>f</sub> )
<b>Resultados de la calibración:</b>	Anexo de la página 3 a la página 6
<b>Incertidumbre:</b>	Se informa en el punto 8 de la página 6 del anexo
<b>Patrón utilizado:</b>	Celda de carga y anillo de carga, marca HBM y ELE, números de serie 012434S y 0119-13-1024 Trazabilidad: HBM 22099 DKD-K-00101 2008-11 y CENAM CNM-CC-720-325/2008
<b>Condiciones ambientales:</b>	Temperatura en (°C) = (23,9 ± 0,4) °C
<b>Procedimiento utilizado:</b>	Comparación directa IT-LF-02** (**Procedimiento no acreditado)
<b>Calibró:</b>	Jonathan González

(1) Las aclaraciones indicadas al reverso de esta hoja forman parte de este certificado

Responsable de la calibración:

Aprobó:

  
Ing. Humberto Tioli Mora  
Jefe Laboratorio de Fuerza

  
Ing. Alejandro Navas Carro  
Director LanammeUCR



Código Postal 11501-2060, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Tel. (506) 2511- 5423 Fax (506) 2511-4440  
E-mail: direccion@lanamme.ucr.ac.cr

## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

FECHA CALIBRACION:	19 de febrero del 2010	No. INFORME: I-0206-10
NOMBRE CLIENTE:	Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes	
DOMICILIO:	Plaza González Víquez, San José	
CONDICIONES AMBIENTALES:	TEMPERATURA: ( 23,9 ± 0,4 ) °C	HUMEDAD RELATIVA: 64%
	<i>( ± x, x representa la variación máxima durante la calibración )</i>	

### 1- DATOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CALIBRACION

EQUIPO BAJO PRUEBA:	Anillo de carga	ALCANCE CALIBRACION:	9,786 kN (2 200 lb <sub>f</sub> )
MARCA:	Humboldt	INDICADOR:	Analógico
MODELO:	H-4454	MARCA:	Humboldt
SERIE No:	1955	SERIE:	072702039
ALCANCE MEDICION:	9,786 kN (2 200 lb <sub>f</sub> )	MODELO:	H 4460
MODO DE OPERACIÓN:	Compresión	PRECISION:	1 div.
OBSERVACIONES:		RESOLUCION:	0,25 div.
	<b>Se reportan unidades de lb<sub>f</sub> como referencia para el interesado. Identificado por cliente como MOPT 2594780</b>		

EQUIPO DE REFERENCIA:	Celda y anillo de carga	INDICADOR:	Digital y analógico
MARCA:	HBM y ELE	MARCA:	HBM y ELE
MODELO:	U15 y 59885/1999	MODELO:	Scout 55 y 59885/1999
SERIE No:	012434S y 0119-13-1024	SERIE:	109491014 y no presenta
ALCANCE MEDICION:	50 y 4,413 kN	RESOLUCION:	0,001 kN y 0,25 div
INCERTIDUMBRE (% L):	0,028 y 1,35 %	PRECISION:	NA y 1 div
FACTOR DE COBERTURA:	k=2		
TRAZABILIDAD:	HBM-Alemania y CENAM México		
No CERTIFICADO:	22099 DKD-K-00101 2008-11 y CNM-CC-720-325/2008		
OBSERVACIONES:			

### 2- RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

El instrumento de referencia (anillo) es instalado en la mesa de aplicación de carga de la máquina de ensayos. Ha permanecido en el sitio por un período mínimo de 12 horas para su ambientación antes del inicio de la toma de datos para la calibración. Se realizan pruebas preliminares de funcionamiento al equipo por calibrar. Se determina el alcance y se aplican fuerzas al 100 % del alcance de calibración (precargas) para la estabilización y acomodamiento de la estructura interna de los elementos. Luego se aplican las fuerzas en el sentido de la calibración (compresión) mediante el hidráulico de la cabeza de carga a cada división correspondiente a los puntos equidistantes previamente distribuidos dentro del alcance de calibración. Cada paso de carga del alcance de calibración es medido 3 veces en una misma posición de montaje de referencia (0°) y dos veces más en forma creciente y decreciente en las siguientes posiciones (120° y 240°)



## Informe de Calibración de Instrumento de Fuerza

No. INFORME: I-0206-10

### 3- RESUMEN DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DEL EQUIPO BAJO CALIBRACION

COMPRESION					
Fuerza aplicada		Lectura promedio	U <sub>expandida</sub> K=2	Error de indicación	Error residual <sup>1)</sup>
(kN)	(lb <sub>f</sub> )	(unidades)	± (% L)	% L	% L
0,979	220	49,60	1,088	---	0,3831
1,959	440	167,10	0,559	---	-0,3796
2,939	661	288,05	0,371	---	0,0692
3,917	881	408,20	0,297	---	-0,0313
4,893	1 100	530,15	0,206	---	0,1406
5,872	1 320	651,10	0,178	---	-0,0415
6,850	1 540	773,95	0,158	---	-0,0137
7,829	1 760	897,25	0,143	---	-0,0220
8,807	1 980	1 021,35	0,134	---	0,0063
9,786	2 200	1 145,75	0,126	---	0,0054

Nota 1: El error residual es debido al uso de la ecuación de mejor ajuste que se observa en el punto 4

### 4- ECUACION DE MEJOR AJUSTE PARA EL EQUIPO BAJO CALIBRACION

#### 4.1. Ecuación de mejor ajuste para obtener la fuerza en función de la lectura observada

$$F_i(L_i) = A + B(L_i) + C(L_i)^2 + D(L_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	A	B	C	D	Tipo de ecuación	
Compresión	5,72055E-01	8,30178E-03	-2,90804E-07	5,61533E-11	cúbica	10 % al 100 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza pronóstico de la ecuación de mejor ajuste que se aplica al equipo bajo prueba, en kN

$L_i$  es la lectura observada en el indicador del equipo a prueba, bajo una fuerza aplicada y se obtiene como:

$$L_i = (\text{Lectura bajo una fuerza aplicada} - \text{Lectura de cero, sin una fuerza aplicada})$$

#### 4.2. Ecuación de mejor ajuste para obtener la lectura en función de la fuerza que se requiere aplicar

$$L_i(F_i) = a + b(F_i) + c(F_i)^2 + d(F_i)^3$$

Coefficientes para $F_i = f(L_i)$	a	b	c	d	Tipo de ecuación	
Compresión	-6,86655E+01	1,19777E+02	5,53021E-01	-1,14666E-02	cúbica	10 % al 100 %

Donde:

$F_i$  es la fuerza aplicada, en kN

$L_i$  es la lectura que deberá observarse en el indicador para obtener la fuerza  $F_i$  deseada.

Página 4 de 6