

---

# Ensayo experimental de la relación de gradiente para determinar el potencial de colmatación de un sistema suelo-geotextil\*

Ernesto A. Parra P.<sup>1</sup>

Magda L. López P.<sup>2</sup>

## RESUMEN

Es bien conocida, por la ingeniería geotécnica, la necesidad de drenar cuanto más sea posible las masas coluviales para mantenerlas en equilibrio y disminuir la reptación de éstas. Como estrategia rutinaria para mejorar la estabilidad de estos taludes, se utilizan geotextiles como medio filtrante para el desarrollo de sistemas de drenaje. Es sabido que la correcta selección del geotextil candidato, no debe depender de las presiones comerciales ejercidas, sino de la aplicación metodológica de procedimientos de diseño, para definir unas condiciones de operación del sistema y evitar que el medio filtrante, en este caso el geotextil, se colmate o tapone con las partículas finas del suelo. Como resultados de este trabajo, se definen los riegos de colmatación de dos tipos de geotextiles, con diferentes suelos, encontrándose diferencias apreciables en su comportamiento, como resultado, se obliga a los diseñadores, que usen geotextiles, a tener en cuenta los

---

\* Mención especial por obtener calificación meritoria en el trabajo de grado (modalidad tesis), USTA, julio 2005. Mención de honor al premio Gerald A. Leonards a mejor trabajo de investigación, otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros, en las XIII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Octubre de 2005.

1 Ingeniero civil. Universidad Santo Tomas, 1985.

2 Ingeniero civil. Universidad Santo Tomás, 2005

dos en "Evaluation of geotextile filter behavior using the gradient ratio test" por Jonathan Fannin, Yoginder Vaid y P. Shi.

Posteriormente se realizaron ensayos para evaluar el potencial de colmatación de varios sistemas suelo-geotextil e inferir las condiciones más favorables bajo las cuales la colmatación disminuye. Para llevar a cabo esta investigación se adoptó la metodología de ensayo propuesta por la ASTM D 5101-90, referida en el manual instructivo para el uso del permeámetro. La investigación está limitada a 8 tipos de suelo encontrados en la sabana de Bogotá susceptibles de ser utilizados con geotextiles (tejido de trama inserta y no tejido punzonado por agujas) en la construcción de obras civiles con aplicaciones filtrantes. Seis de estos suelos fueron utilizados para la calibración del permeámetro. Las propiedades de los suelos y los geotextiles empleados se encuentran especificadas en el numeral cuatro de este trabajo.

La utilidad de este proyecto radica en conocer en qué consiste el mecanismo de colmatación, e identificar qué propiedades de los suelos y de los geotextiles favorecen el retardo de dicho proceso y así adaptarlas de acuerdo a las condiciones existentes en cada uno de los lugares donde se demande la implementación de geotextiles, bajo los requerimientos de filtración. Esto se logró mediante la ejecución del programa de ensayos (numeral 5), la condensación de datos y el análisis detallado de los resultados obtenidos, como se muestra en el numeral 6.

Esta investigación será sin duda una buena herramienta para el desarrollo de nuevos proyectos que conduzcan a nuevos criterios de utilización de geotextiles y así optimizar estudios futuros.

Esta investigación está dirigida a todas aquellas personas que se desenvuelven en el área geotécnica y cualquier profesional interesado en tener presente

los parámetros filtrantes de un sistema suelo-geotextil, como a quienes deseen profundizar esta investigación, incluyendo otras variables de ensayo que no son contempladas en este proyecto. A los fabricantes de geotextiles interesados en optimizar sus productos en beneficio de las obras de ingeniería y a las empresas o entidades interesadas en actualizar la normatividad para el diseño y construcción de obras civiles.

## 1 Teoría de la colmatación de un sistema suelo-geotextil

### 1.1 Mecanismos de posicionamiento del suelo

Para una aplicación específica, en ensayos de laboratorio de filtración, es necesario predecir el comportamiento de un sistema filtrante. Se han determinado tres mecanismos de posicionamiento del suelo (Rollin y Lombard, 1988):

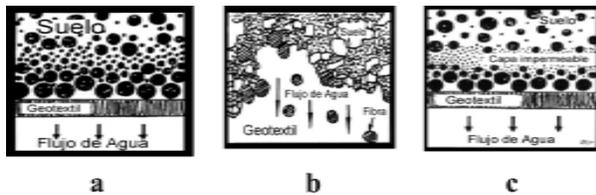
Las partículas de suelo forman un puente para permitir el paso del flujo "*filter bridging network*" (fig.1a). Formación de "cuevas" o "bóvedas", generalmente en suelos aluviales o arenas con gran contenido de arcillas (fig. 1b). Formación de una capa burda sobre el geotextil, que intercepta partículas finas, formando así una capa de baja permeabilidad (fig.1c).

Debe hacerse distinción entre los mecanismos de posicionamiento del suelo y los mecanismos debidos a la modificación de la estructura de un geotextil (Mylmareck, 1990) referidas a:

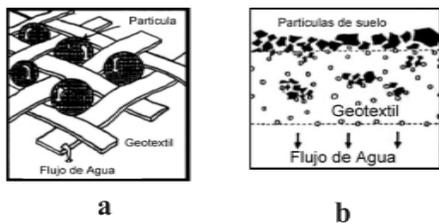
- a. La obstrucción de un geotextil que es más frecuente que suceda en geotextiles tejidos que en no tejidos. Ocurre cuando cualquier partícula impide el paso de flujo porque queda atrapada sobre las aberturas del geotextil tejido (fig.2a).

b. La colmatación ocurre cuando las partículas de suelo entran en el espesor de la estructura del geotextil no tejido. El nivel de colmatación de un geotextil depende del número de finos hospedados dentro del geotextil (fig.2b).

**Figura 1.** Mecanismos de establecimiento del suelo. a. Puente, b. Cuevas, c. Capa impermeable



**Figura 2.** Mecanismos debidos a la modificación de la estructura de un geotextil. a. Obstrucción, b. Colmatación



## 1.2 Teoría del ensayo de relación de gradiente

El ensayo de relación de gradiente (relación de dos cabezas hidráulicas diferentes) ha sido desarrollado para evaluar el potencial de colmatación de un sistema suelo-geotextil, es decir, la tendencia del geotextil a perder permeabilidad debido a las partículas de suelo alojadas en los poros del geotextil. Este ensayo es llevado a cabo, mediante un permeámetro de cabeza constante en el cual se coloca una muestra de suelo y una muestra de geotextil.

El ensayo consiste en imponer varios gradientes hidráulicos (cabeza de presión) al sistema suelo-geotextil y realizar observaciones de las variaciones de la cabeza de agua ( $\Delta h$ ) y calcular la variación de

la permeabilidad ( $K_{s-g}$ ) con respecto al tiempo. La figura 3 ilustra el significado de los valores empleados en las ecuaciones de cálculos.

El gradiente hidráulico está definido como la pérdida de cabeza hidráulica por distancia unitaria de flujo. Para su cálculo se emplea la ecuación 1.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Donde

$i$  = gradiente hidráulico del sistema

$\Delta H$  = diferencia de las lecturas de los piezómetros para la zona analizada, piezómetro 1 menos piezómetro 12.

$L$  = Espesor de la muestra de suelo analizada, cm.

La permeabilidad del sistema debe ser evaluada a la temperatura registrada durante el ensayo y luego debe ser corregida a 20°C, usando las ecuaciones 2 y 3.

$$K_t = \frac{Q}{[i \cdot A \cdot t] 100} \quad (2)$$

$$K_{20} = \frac{K_t \cdot \mu_t}{\mu_{20}} \quad (3)$$

Donde

$K_t$  = Permeabilidad del sistema a la temperatura del ensayo, m/s.

$K_{20}$  = Permeabilidad del sistema a 20 °C, m/s.

$Q$  = Cantidad de flujo medido en  $cm^3$ .

$i$  = Gradiente hidráulico del sistema.

$A$  = Área transversal de la muestra de suelo,  $cm^2$ .

t = Tiempo en el que se mide la cantidad de flujo.

$\mu_t$  = Viscosidad del agua a la temperatura del ensayo.

$\mu_{20}$  = Viscosidad del agua a 20°C.

La relación de gradiente (RG) es la relación entre el gradiente hidráulico a través del sistema suelo-geotextil y el gradiente hidráulico a través del suelo solamente. Estos valores son los indicadores del grado de colmatación que presenta un sistema suelo-geotextil. La RG se calcula usando las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$R.G = \frac{L_s \cdot \Delta h_{sf}}{L_{sf} \cdot \Delta h_s} \quad (4)$$

Donde

$$\Delta h_s = \frac{(P_2 - P_4) + (P_3 - P_5)}{2} \quad (5)$$

$$\Delta h_{sf} = \frac{(P_4 - P_{12}) + (P_5 - P_{12})}{2} \quad (6)$$

$P_n$  = Lectura del piezómetro, cm, para el piezómetro numerado n.

$L_s$  = 5.0 cm (distancia entre el puerto del piezómetro 3 y 5).

$L_{sf}$  = 2.5 cm (distancia entre el puerto del piezómetro 5 y la muestra de geotextil).

i = Gradiente hidráulico del sistema.

$\Delta h$  = diferencia de altura entre los piezómetros de la zona analizada.

L = longitud o espesor de la muestra de suelo entre los piezómetros analizados.

La relación de Gradiente modificado ( $RG_{mod}$ ) es un mejor indicador de la pérdida de energía en la interfase del compuesto suelo-geotextil. Para esto se implementaron en el permeámetro dos pares nuevos de piezómetros. La  $RG_{mod}$  se evalúa como se muestra en la ecuación 7.

$$RG_{mod} = \frac{10[(P_{10} - P_{12}) + (P_{11} - P_{12})]}{1,6[(P_2 - P_4) + (P_3 - P_5)]} \quad (7)$$

Para hacer comparables los valores de RG con los valores de  $RG_{mod}$ , se establece una equivalencia entre estos<sup>1</sup>, así como se muestra en las ecuaciones 8 y 9.

$$RG_{mod} = (3,2 \cdot RG_{ASTM}) - 2,2 \quad (8)$$

Donde

$RG_{mod}$  = Relación de gradiente modificado.

$RG_{ASTM}$  = Relación de gradiente de acuerdo a la norma ASTM.

Como parámetros *The American Society for Testing and Materials* (ASTM, D 5101-90) establece que un valor de relación de gradiente (RG) de aproximadamente 1, indica que el geotextil no ha sido afectado por el flujo hidráulico que pasa a través del sistema y que el suelo es internamente estable. Una RG menor que 1, indica la inestabilidad interna del suelo con algunas partículas adyacentes moviéndose fuera del sistema. También puede indicar la colmatación o restricción de los puertos de los piezómetros debido al crecimiento de algas o presencia de burbujas de aire. Una RG mayor que 1, indica la colmatación del sistema o restricciones cerca de la superficie del geotextil.

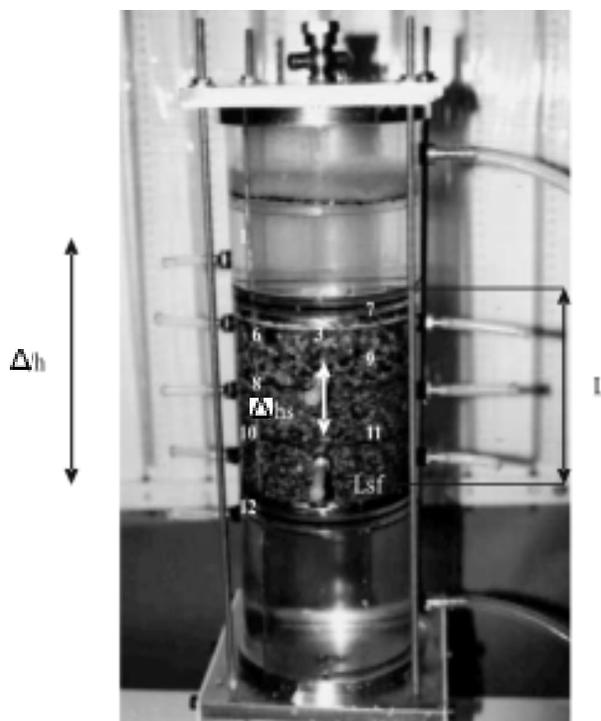
1 Y.C Shi, R.J Fannin y Y.P Vaid. "Evaluation of geotextil filter behavior using the gradient ratio test", documento en el cual explican el cálculo de la relación de gradiente modificado y su equivalencia con respecto a los valores de relación de gradiente establecida por la A.S.T.M.

Por otro lado, estudios realizados anteriormente proponen que el máximo valor admisible de RG sea 3 para que el sistema suelo-geotextil sea compatible<sup>2</sup>. Por lo tanto, la compatibilidad de un sistema se establece si simultáneamente: los valores de relación de gradiente fluctúan entre 1 y 3 con respecto al tiempo, y si el sistema logra estabilizarse internamente para que la permeabilidad sea constante con respecto al tiempo. Debe tenerse en cuenta que una RG o  $RG_{mod}$  mucho mayor que 1 indican que se presenta un exceso de pérdida de energía en la interfase suelo-geotextil. Esto indica que la permeabilidad de la capa suelo-geotextil es mucho menor que la del mismo suelo<sup>3</sup>. Es importante tener en cuenta que las pérdidas de cabeza de agua producidas en la interfase están notablemente influenciadas por el espesor de la pantalla de soporte del suelo del permeámetro.

**Tabla 1.** Significado de los valores de Relación de Gradiente y Relación de Gradiente modificada

Relación de Gradiente (R.G)	Significado
$R.G < 1$	Inestabilidad interna del suelo con algunas partículas adyacentes moviéndose fuera del sistema
$R.G = 1$	Indica que el geotextil no ha sido afectado por el flujo hidráulico que pasa a través del sistema y que el suelo es internamente estable.
$R.G > 1$	Indica la colmatación del sistema o restricciones cerca de la superficie del geotextil.
$1 < R.G < 3$	Indica la compatibilidad de un sistema.
$R.G_{mod} >> 1$	Indica que se presenta un exceso de pérdida de energía en la interfase suelo-geotextil

**Figura 3.** Significado de los valores empleados en las ecuaciones de cálculos



## 2 Descripción del permeámetro de cabeza constante

Para llevar a cabo el ensayo de relación de gradiente se elaboró un permeámetro de cabeza constante de paredes rígidas, según las especificaciones de la norma ASTM, D 5101-90 y mejorado con algunas modificaciones según "Evaluation of geotextile filter behavior using the gradient ratio test"<sup>4</sup>.

- 2 Todos los autores mencionados a continuación coinciden en recomendar que el máximo valor admisible de R.G sea 3, Haliburton y Wood 1982, Robert G, Carrol Jr. 1987, F.H.W.A 1986.
- 3 Tal como lo afirman Y.C Shi, Fannin y Y.P. Vaid, "Evaluation of geotextile filter behavior using the gradient ratio test".
- 4 Y.C Shi, R.J Fannin y Y.P Vaid. Documento en el cual describen y explican las modificaciones hechas al permeámetro de cabeza constante utilizado por la A.S.T.M. y el cálculo de la relación de gradiente modificado.

## 2.1 Permeámetro de paredes rígidas

Se compone de tres secciones de acrílico en las cuales se han dispuesto 14 racores: 12 para conectar los piezómetros y 2 para entrada y salida de agua (ver anexo A, manual instructivo para el uso del permeámetro). Los piezómetros 1 y 12 son usados para chequear el gradiente impuesto al sistema suelo-geotextil. Los piezómetros 2, 3, 4, 5 y 12 son usados para determinar la relación de gradiente de acuerdo a la norma ASTM D5101-90 (ver cálculos numeral. 3).

Los piezómetros 10,11 y 12 son utilizados para calcular la relación de gradiente modificado según *Evaluation of geotextile filter behavior using the gradient ratio test*<sup>8</sup>, el que provee un mejor indicador de la pérdida de energía en la interfase del compuesto suelo-geotextil.

Los piezómetros 6, 7, 8, 9,10 y 11 se usan para monitorear la reconstitución homogénea de la muestra de suelo, lo cual se aprecia si la distribución de cabezas hidráulicas en estos piezómetros es lineal. En la sección superior se colocó un dissipador de energía para prevenir posibles disturbios en la cara superior de la muestra de suelo, debido a la entrada de ratas de flujo elevadas.

## 2.2 Tanques de abastecimiento de agua

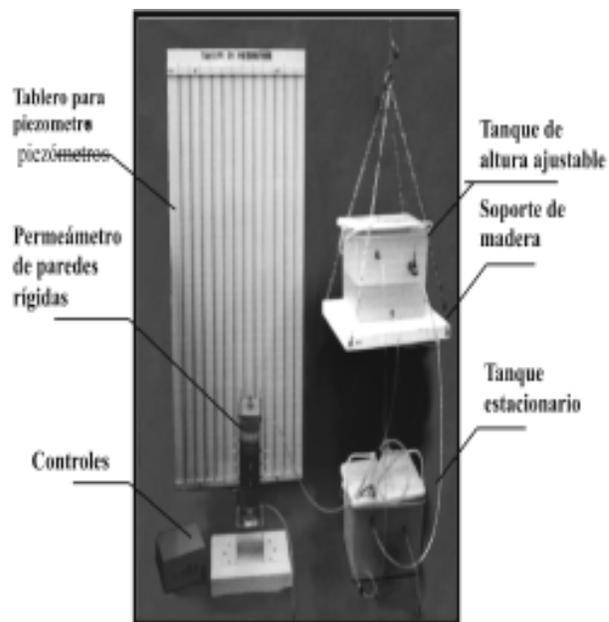
Se coloca un tanque con agua sobre el soporte de madera colgado de una guaya, para variar la altura, por medio de un motor con polea dentada, desde una caja de controles. Los racores de los tanques (de altura ajustable y estacionario) deben conectarse por medio de mangueras plásticas al permeámetro de paredes rígidas.

## 2.3 Tablero para piezómetros

A excepción de los piezómetro 1 y 12, todos los demás están ubicados por pares, es decir, el piezómetro # 2 se encuentra enfrentado con el # 3, ubicados a la misma altura de la muestra de suelo,

lo cual quiere decir que las lecturas de la cabeza de presión hechas en cada par de piezómetros debe ser similar. Lo mismo sucede con los piezómetros # 4 y # 5, # 6 y # 7, # 8 y # 9, # 10 y #11.

**Figura 4.** Elementos que componen el permeámetro de cabeza constante



**Nota:** Para observar detalles de ensamble de cada una de las partes del permeámetro, ensamble de cada uno de los tanques de abastecimiento de agua, funcionamiento y ejecución del ensayo de relación de gradiente, remítase al manual instructivo para el uso del permeámetro, tesis "Ensayo de relación de gradiente para determinar el potencial de colmatación de un sistema suelo-geotextil", 2005. Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingeniería Civil.

## 3 Metodología de ensayo para la prueba de laboratorio de relación de gradiente

La metodología de ensayo adoptada para este ensayo es la descrita por la norma ASTM D 5101 de 1990, a la cual se le han realizado algunas adaptaciones

para utilizar el permeámetro elaborado en esta investigación.

Para llevar a cabo correctamente el ensayo deben tenerse en cuenta las disposiciones preliminares de los materiales a utilizar (agua, suelo, geotextil), ensamble del permeámetro, colocación del suelo y saturación del sistema, de acuerdo a lo descrito en la norma ASTM D 5101-90, en el manual instructivo para el uso del permeámetro (anexo A) y el video que explican detalladamente el modo de ensamble, uso, limpieza y desmontaje del mismo, así como el protocolo para ejecutar la prueba.

### 3.1 Ejecución de la prueba

**3.1.1** Verificar que todos los piezómetros tengan una escala común de referencia de elevación.

**3.1.2.** Conectar todas las mangueras de 3/16" a sus racores correspondientes del permeámetro (1 hasta el 12) y posteriormente a los piezómetros del tablero. Esto ayudará a que no queden burbujas de aire atrapadas en las mangueras ni en los tubos de los piezómetros. Revise y remueva las burbujas de aire encontradas en las mangueras o piezómetros mediante una ligera vibración. Todos los piezómetros deben tener la misma lectura.

**3.1.3** Encender la bomba para iniciar la recirculación del agua.

**3.1.4** Abrir completamente la llave de paso entre el tanque de entrada de agua (tanque de altura ajustable) y el puerto superior del permeámetro.

**3.1.5** Abrir la llave de paso de la manguera entre el permeámetro y el tanque de agua estacionario para permitir el flujo y registrar el tiempo de iniciación.

**3.1.6** Ajustar la altura del tanque de entrada de agua al nivel del gradiente hidráulico de 1 (ver ecuación 1).

**3.1.7** Registrar los siguientes a 0, 1/2, 1, 2, 4, 6 y 24 horas desde que se inició la prueba.

**3.1.7.1** El tiempo en horas acumuladas.

**3.1.7.2** La tasa de flujo del sistema; tiempo (t) en segundos para una medida de cantidad de flujo (Q) en centímetros cúbicos. Medir por una duración mínima de 30 segundos y una cantidad mínima de flujo de 10 cm<sup>3</sup>.

**3.1.7.3** La temperatura (T) del agua del sistema en grados Celsius.

**3.1.7.4** El nivel de agua se lee en cada piezómetro individualmente.

**3.1.7.5** La fecha y el tiempo del día.

**3.1.8** Después de 24 horas se toman los datos correspondientes y se eleva el tanque de entrada de agua (ajustable) para obtener un gradiente hidráulico del sistema (i)=2.5. Se registra el tiempo y todos los datos después de 1/2 hora.

**3.1.9** Después de 24 horas se eleva el tanque de entrada de agua para obtener i= 5. Repetir las medidas como en 3.1.7.

**3.1.10** Después de 24 horas, hacer las lecturas y elevar el tanque de entrada de agua para obtener i = 7.5. Registrar el tiempo. Después de 1/2 hora, registrar todos los datos.

**3.1.11** Elevar el nivel del tanque de entrada de agua para obtener i= 10. Repetirlas medidas como en 3.1.7.

La prueba debe ser ejecutada continuamente. Una vez la prueba ha empezado, ésta no será interrumpida y luego resumida.

## 4 Descripción de los materiales utilizados

### 4.1 Suelos

Para la ejecución de los ensayos, se utilizaron 3 tipos de suelo representativos de la Sabana de Bogotá: una arena de origen aluvial, gris, cuarzoso; un limo orgánico, café oscuro y la fracción fina de un material granular para base (tipo B-400, IDU), originaria de Mondoñedo.

#### 4.1.1 Clasificación de los suelos

Se elaboró una curva granulométrica para cada una de las arenas a emplear: arena gruesa, media, fina y combinaciones de arena gruesa + media, media + fina y gruesa + media + fina. Luego se seleccionó el material de acuerdo a esas curvas. El análisis granulométrico se realizó basado en el método mecánico de acuerdo a la norma ASTM D 421-58 y D 422-63.

Las muestras de limo orgánico y de material granular para base fueron ensayadas tal como se encuentran en el sitio.

La clasificación de suelos se llevó a cabo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Los resultados de los ensayos y propiedades geotécnicas se presentan en la tabla 2.

### 4.2 Geotextiles

#### 4.2.1 Funciones de los geotextiles

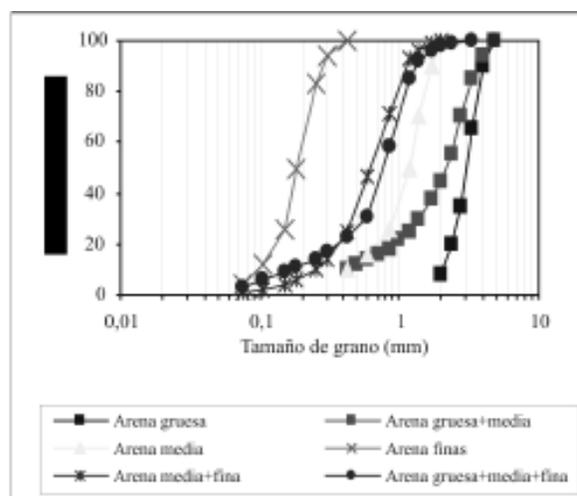
Entre las funciones de los geotextiles se encuentran la separación, el refuerzo, protección, drenaje y filtración. Siendo la filtración la función concerniente al ensayo de relación de gradiente.

Función de filtración en los geotextiles: Es la capacidad del geotextil para permitir el paso del agua a través de los poros, en sentido perpendicular a su plano, impidiendo que las partículas sólidas pasen a

Tabla 2. Propiedades geotécnicas de los suelos utilizados

Suelo	Límite líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad	Clasificación (USCS)
Arena Gruesa	ML	NP	*	SP
Arena Gruesa + Media	ML	NP	*	SP
Arena Media	ML	NP	*	SP
Arena Media + Fina	ML	NP	*	SM
Arena Fina	ML	NP		SM
Gravel Gruesa + Media + Fina	ML	NP	*	GW
Limo Orgánico	28.2	18.7	9.50	ML
Material granular para base (tipo B-400, IDU)	29.45	19.07	10.38	CL (fracción fina)

Figura 5. Curvas granulométricas de los suelos utilizados en los ensayos



través del geotextil. Esta función está directamente influenciada por la estructura de sus fibras (tamaño y distribución de poros), la retención, la permeabilidad y la distribución de los tamaños de granos de suelo utilizados en el proyecto.

### 4.2.2 Geotextiles utilizados

- Geotextil Tejido de trama inserta: Se forman entrelazando una serie de lazos de uno o más filamentos formando una estructura plana. Es aquel que tiene urdimbre y trama.

- Geotextil No tejido punzonado por agujas: Se forman con filamentos o fibras cortas dispuestas según un patrón orientado al azar en una estructura plana. Esos filamentos o fibras cortas son inicialmente dispuestos en una red o malla suelta. Luego son unidos entre si por agujas.

## 5 Programa de ensayos

Para ejecutar los ensayos de relación de gradiente se utilizaron 2 tipos de geotextiles con 8 tipos de suelo. Para calibrar el permeámetro y verificar su funcionamiento, se utilizaron varias muestras de arena con diferentes granulometrías. Para iniciar los ensayos se seleccionó una arena aluvial, gris, cuarzosa gruesa que garantizara la no colmatación del geotextil. Luego, se incrementó progresivamente el contenido de finos en cada una de las muestras para observar paulatinamente los cambios de la relación de gradiente y la permeabilidad del sistema con respecto al tiempo. Una vez comprobado el buen funcionamiento del permeámetro, se practicaron ensayos con muestras de suelo usados comúnmente en rellenos controlados. Se eligió un limo orgánico y un material granular para base usada en la construcción de vías tipo B-400, IDU.

Por cada combinación de un suelo con un geotextil, se realizaron tres ensayos. La tabla 3 muestra claramente el programa de ensayos ejecutados.

Los resultados obtenidos de los tres ensayos de cada combinación fueron promediados para percibir un comportamiento representativo de cada sistema. Las curvas promedio fueron analizadas y comparadas

entre sí para determinar cuáles sistemas suelo-geotextil revelaban un óptimo desempeño filtrante.

**Nota:** Los resultados obtenidos de los sistemas con limo orgánico y material granular para base, no se presentan en este documento debido a que no son comparables con otras experiencias de la bibliografía revisada.

**Tabla 3.** Programa de ensayos

Número de combinación	Geotextil	Suelo	Número de ensayos
1	GTXL-NT*	Arena Gruesa	3
2	GTXL-NT*	Arena Gruesa + Media	3
3	GTXL-NT*	Arena Medica	3
4	GTXL-NT*	Arena Medica + Fina	3
5	GTXL-NT*	Arena Fina	3
6	GTXL-NT*	Grava gruesa + media + fina	3
7	GTXL-NT*	Limo Orgánico	3
8	GTXL-NT*	Material granular para base (tipo B-400, IDU)	3
9	GTXL-TTI*	Arena Gruesa	3
10	GTXL-TTI*	Arena Gruesa + Media	3
11	GTXL-TTI*	Arena Medica	3
12	GTXL-TTI*	Arena Medica + Fina	3
13	GTXL-TTI*	Arena Fina	3
14	GTXL-TTI*	Grava gruesa + media + fina	3
15	GTXL-TTI*	Limo Orgánico	3
16	GTXL-TTI*	Material granular para base (tipo B-400, IDU)	3
		Número total de ensayos	(48)

GTXL-TTI\* Geotextil tejido de trama inserta

GTXL-NT\* Geotextil No tejido punzonado por agujas

## 6 Resultados

**Tabla 4.** Resumen de resultados de ensayos de los sistemas de suelo con geotextil no tejido, punzonado por agujas y con geotextil tejido de trama inserta.

SUELO	R.L.D < 1	1 < R.L.D < 2	R.L.D > 2	Cu	Permeable al Drenaje natural	Permeabilidad constante	Tiempo de Estabilización [horas]	Estable	Compatibilidad del sistema
Arena aluvial gruesa	-	-	Si	1,8	No	No	-	No	No
Arena aluvial gruesa + media	-	-	Si	5,8	Si	Si	2	Si	No
Arena aluvial media	-	-	Si	3,0	No	No	-	No	No
Arena aluvial media + fina	Si	-	-	3,0	No	Si	4	No	No
Arena aluvial fina	Si	-	-	1,8	No	No	6	No	No
Arena aluvial gruesa + media + fina	-	Si	-	6,0	Si	Si	3	Si	Si
Limo orgánico	-	-	-	-	-	-	-	-	No
Si 400	-	-	-	-	-	-	-	-	No
Arena aluvial gruesa	-	-	Si	1,8	No	No	-	No	No
Arena aluvial gruesa + media	-	-	Si	5,8	Si	Si	1	No	No bueno
Arena aluvial media	-	Si	-	3,0	Si	Si	1	Si	Si
Arena aluvial media + fina	-	Si	-	3,0	Si	Si	1	Si	Si
Arena aluvial fina	-	Si	-	1,8	No	Si	6	Si	Si
Arena aluvial gruesa + media + fina	-	Si	-	6,0	Si	Si	0,5	Si	Si
Limo orgánico	-	-	-	-	-	-	-	-	No
Si 400	-	-	-	-	-	-	-	-	No

-  No cumple con ese parámetro.
-  El geotextil le resta las propiedades drenantes a este tipo de suelo  
sin embargo debe tenerse en cuenta el comportamiento caso por caso
-  Óptimo desempeño filtrante
- Cu Coeficiente de uniformidad

6.1. Comparación de las curvas promedio de todos los sistemas de arena aluvial fina con geotextil no tejido y geotextil tejido de trama inserta.

Los gráficos # 17, 18, 19 y 20 (fig. 6) muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados en los sistemas de arena aluvial fina con geotextil no tejido. Los resultados de los sistemas de arena aluvial fina con geotextil tejido de trama inserta se presentan en los gráficos # 45, 46, 47 y 48 (fig. 7); en ellas se puede observar:

- Los valores de RG (# 17 y 45) sufren cambios bruscos durante las primeras 6 horas, esto es atribuido a que el sistema es sometido a un gradiente hidráulico (ver gráfica # 20 y 48 i vs. t) el cual ocasiona el movimiento y reacomodación de las partículas de suelo. Durante este proceso se percibe la irregularidad de la permeabilidad del sistema (gráfica # 19 y 47).
- En el transcurso de 6 a 24 horas de ensayo, la pendiente de la curva de RG es positiva, es decir que la relación de gradiente aumentó con el transcurso del tiempo. De esta manera es posible deducir una colmatación del sistema ocasionada por la migración de partículas de suelo en el interior del geotextil no tejido (ver fig. 2b) y es posible deducir una obstrucción del sistema, ocasionada cuando cualquier partícula de suelo impide el paso de flujo porque ésta queda atrapada sobre las aberturas del geotextil tejido (ver fig. 2a). Lo anterior trae como consecuencia la disminución de la permeabilidad del compuesto suelo-geotextil (ver gráfica #19 y 47)<sup>5</sup>.
- Después de pasar 24 horas de ensayo, se aumentó el gradiente hidráulico impuesto al sistema (ver

grafico # 20 y 48), el cual ocasionó la movilidad interna de las partículas de suelo y un destaponamiento del sistema. Esto se evidencia con la disminución abrupta de la RG, el aumento de la permeabilidad y la fluctuación de sus valores durante las siguientes 6 horas.

- A las 30 horas de ensayo, se observó que la relación de gradiente se mantuvo relativamente constante con respecto al tiempo hasta el final del ensayo, sin embargo la permeabilidad disminuyó y el gradiente hidráulico del compuesto se incrementó. Esto se explica si se tienen en cuenta los valores de RG mod. (gráfica # 18 y 46) los cuales revelan que en la interfase suelo-geotextil aún se presenta colmatación. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, resulta más relevante analizar los resultados de relación de gradiente modificado, ya que estos son mejores indicadores del desempeño filtrante de un sistema suelo-geotextil<sup>6</sup>.
- Es fundamental reconocer que la pendiente de la curva de relación de gradiente (gráfica # 17 y 45), el primer día (de 6 a 24 horas) fue mayor a la del segundo (de 30 a 48 horas). Este hecho puede explicarse debido a que, en el segundo día, las partículas de suelo ya habían sido sometidas a dos gradientes hidráulicos, es decir, que las partículas se habían reacomodado dos veces. Sin embargo, si se observan los gráficos de RG mod. (# 18 y 46) se logra apreciar que las pendientes entre 6 a 24 horas y 30 a 48 horas de ensayo, mostraron un comportamiento similar (las pendientes son paralelas). Este hecho puede atribuirse a la formación del *Filter cake* en la interfase suelo-geotextil, que contribuyó al equilibrio interno del suelo y consecuentemente a la similitud de los

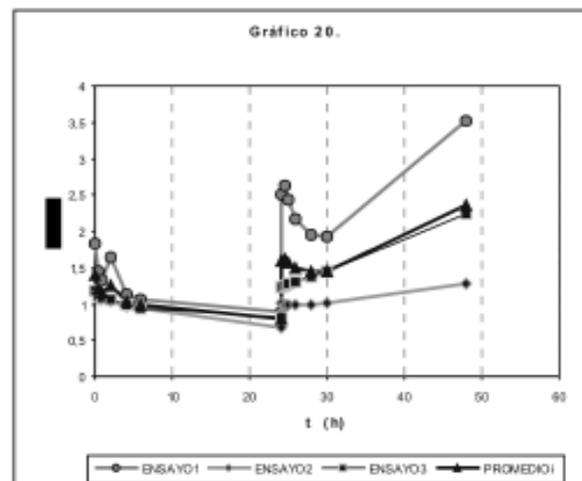
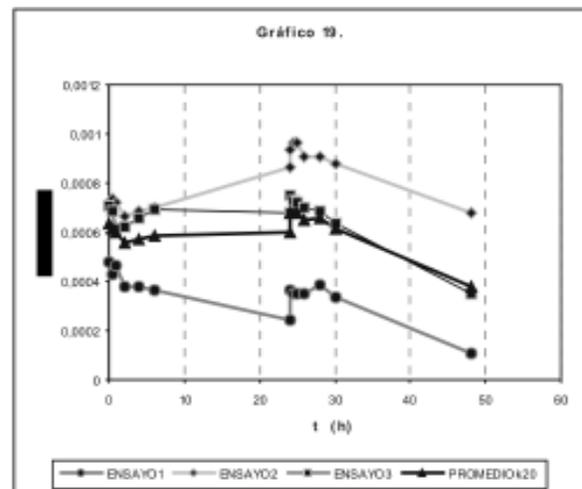
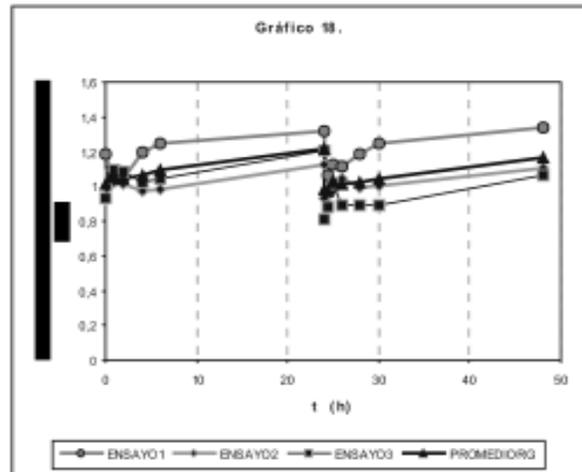
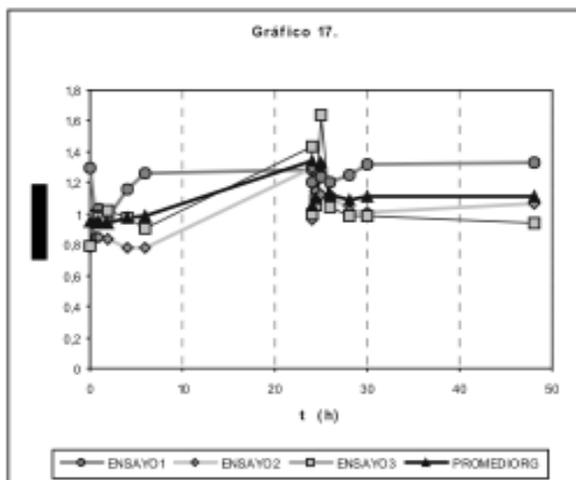
5 Resultados congruentes de acuerdo a investigaciones realizadas por Dave Ta-Teh Chang, Yu-Chen Nieh, N.W.M John y P.D.J Watson.

6 "Review clogging behavior by the modified gradient ratio test device with implanted piezometers" por Dave Ta-Teh Chang, Yu-Chen, Chiwan Hsieh y You-Quan Chen, muestra el desarrollo de una serie de ensayos de R.G usando el permeámetro propuesto en un estudio anterior por Dave Ta-Teh Chang[5] (implementando un nuevo par de piezómetros) para analizar las diferencias entre los valores convencionales de R.G y R.G modificado. Dichos ensayos revelaron la conveniencia de analizar los resultados de R.G mod.

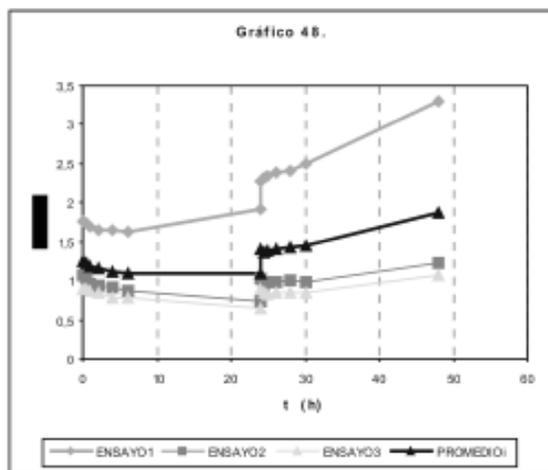
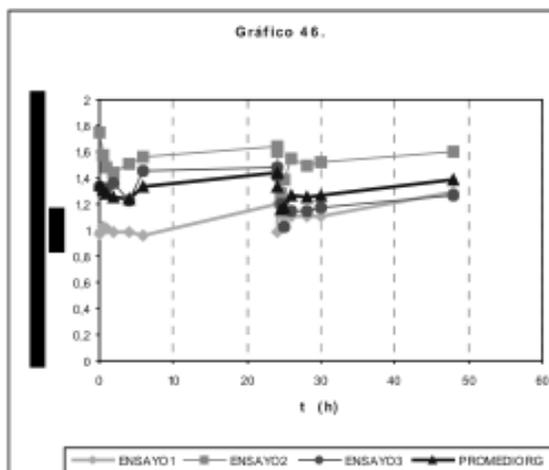
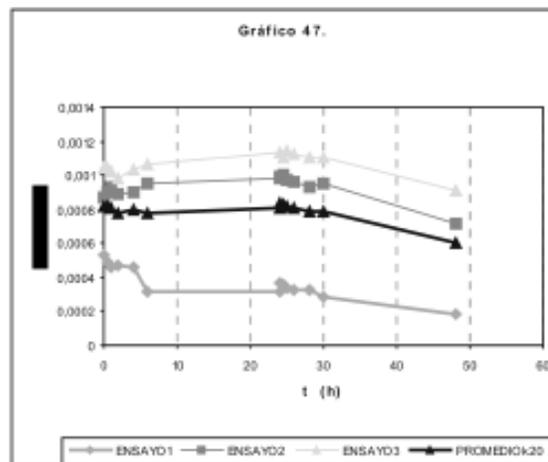
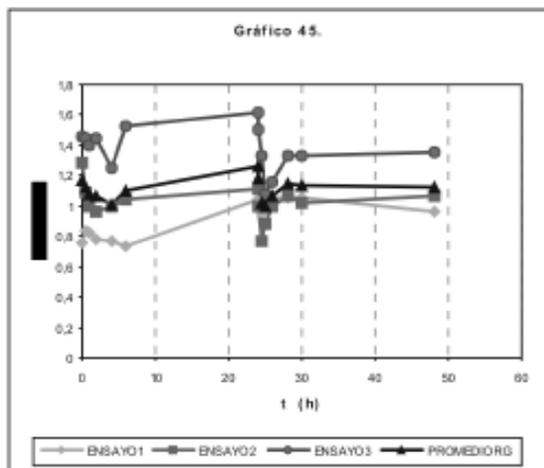
valores de relación de gradiente modificado. De esta manera se reitera una vez más que la RG mod. es un mejor indicador del desempeño filtrante de un sistema suelo-geotextil.

Como consecuencia del análisis previo de los resultados de RG y RG. mod., resultó más apropiado tener en cuenta los valores de RG mod. entre 1 y 3, para establecer que los sistemas de arena aluvial fina con geotextil no tejido y arena aluvial fina con geotextil tejido de trama inserta, son compatibles ante los requerimientos filtrantes, al menos bajo las condiciones del ensayo.

**Figura 6.** Gráficos de (17) relación de gradiente, (18) relación de gradiente modificado, (19) permeabilidad y (20) gradiente hidráulico de un sistema de arena aluvial fina con un geotextil no tejido punzonado por agujas.



**Figura 7.** Gráficos de (45) relación de gradiente, (46) relación de gradiente modificado, (47) permeabilidad y (48) gradiente hidráulico de un sistema de arena aluvial fina con un geotextil tejido de trama inserta.



- En los gráficos # 61, 62, 63 y 64 (fig. 8) se compara el desempeño filtrante de los sistemas de arena aluvial fina con geotextil no tejido punzonado por agujas y geotextil tejido de trama inserta. De estas curvas se observó que el sistema con geotextil tejido presentó un desempeño filtrante superior con respecto al sistema con geotextil no tejido. Lo anterior se evidencia por:
- En el sistema de arena fina con GTXL-NT se reconoce el movimiento de partículas de suelo fuera

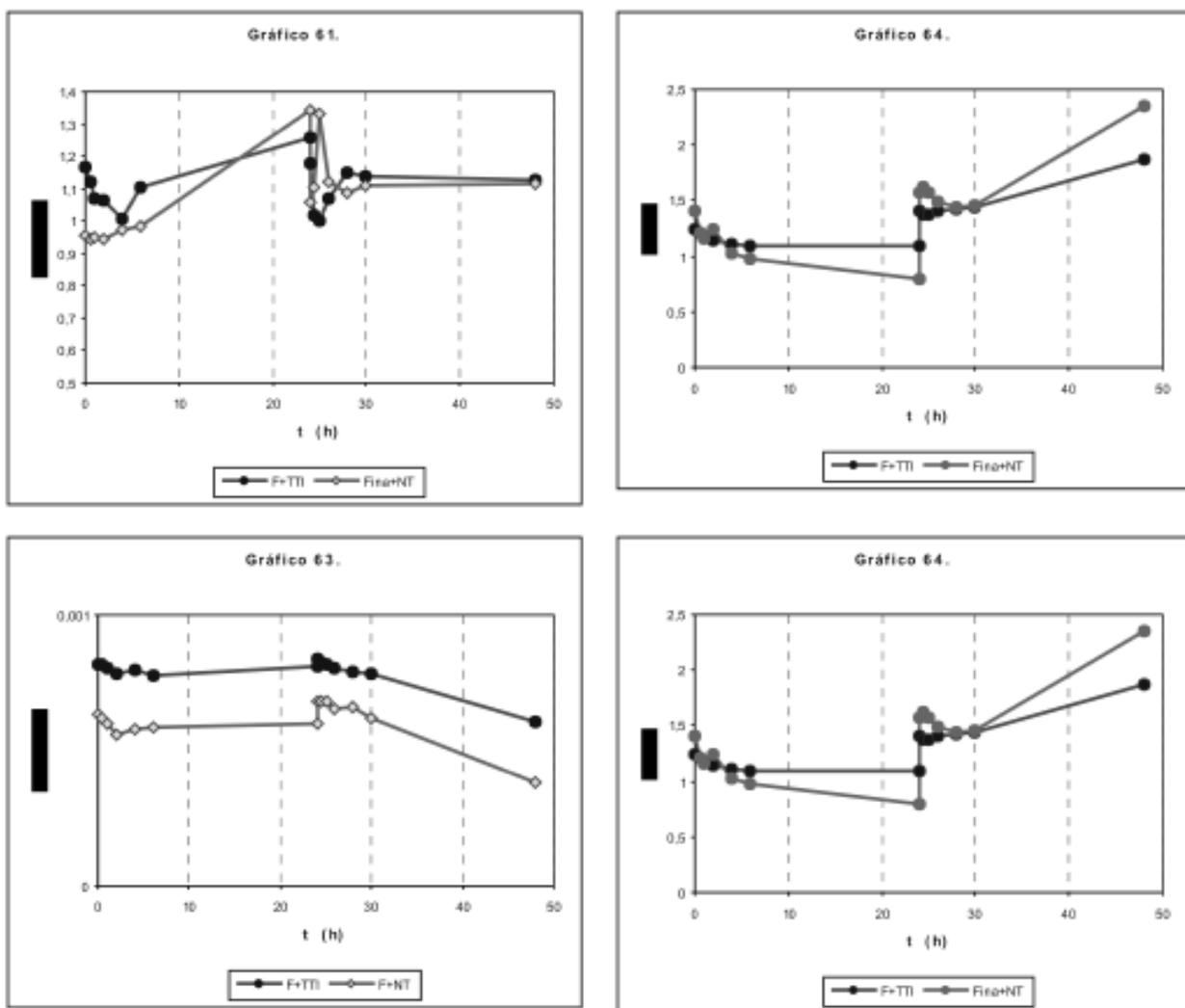
del sistema mediante los valores de  $RG < 1$ , es decir, que se presenta la tubificación de la muestra de suelo (ver # 61). Característica contraria a la presentada por el sistema de arena fina con GTXL-TTI el cual favoreció la retención de las partículas (no presentó  $RG < 1$ ).

- Los valores de  $RG$  mod. señalan que en la interfase del sistema con geotextil no tejido el flujo exhibió menos pérdidas de energía, con respecto al

sistema con geotextil tejido, esto se explica debido a la migración de partículas de suelo mencionada anteriormente (véase gráfico # 62).

- Comparando la permeabilidad de estos dos compuestos, se ve claramente que el compuesto con GTXL-TTI favorece el paso de mayor cantidad de
- De esta manera se establece que el GTXL-TTI es compatible con arena aluvial fina ante los requerimientos de permeabilidad y retención.

**Figura 8.** Gráficos de las curvas promedio de (61) relación de gradiente, (62) relación de gradiente modificado, (63) permeabilidad y (64) gradiente hidráulico de todos los sistemas compatibles de arena aluvial fina con geotextil no tejido punzonado por agujas y arena aluvial con geotextil tejido de trama inserta.



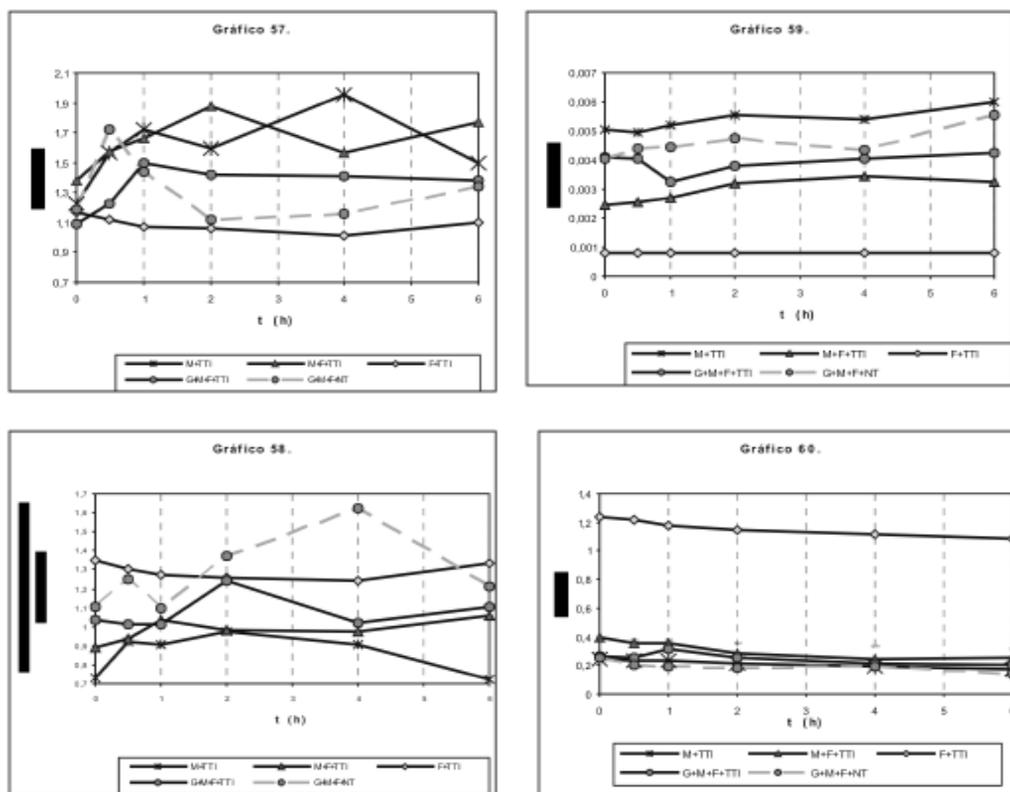
6.2. Comparación de las curvas promedio de todos los sistemas compatibles de arena aluvial con geotextil no tejido y geotextil tejido de trama inserta.

En los gráficos # 57, 58, 59 y 60 (fig.9) se muestran claramente las curvas promedio de relación de gradiente, relación de gradiente modificado, permeabilidad y gradiente hidráulico de todos los sistemas que revelaron un buen desempeño filtrante, es decir, que presentaron valores de RG, entre 1 y 3, denotando así la compatibilidad de los materiales ante los requerimientos de filtración. Teniendo en cuenta los gráficos mencionados y la tabla 4 que condensa los resultados obtenidos se señala:

- El sistema de arena gruesa + media + fina con geotextil tejido de trama inserta presenta un me-

or desempeño que el sistema conformado por arena gruesa + media + fina con geotextil no tejido punzonado por agujas. Lo anterior se explica, debido a que la combinación con GTXL-NT no favoreció la rápida formación del *Bridge network*, mientras que en la combinación con GTXL-TTI si se propició desde el comienzo del ensayo, razón por la cual la combinación con GTXL-NT tardó 2 horas en encontrar el equilibrio interno, mientras la combinación con GTXL-TTI tardó 1 hora (ver gráfico #57). Es posible distinguir la formación del *Bridge network* mediante los valores de RG mod. los cuales son menores a los de RG de la ASTM, señalando así, que se presentan menos pérdidas de energía hidráulica en la interfase del compuesto con arena gruesa + media + fina con GTXL-TTI.

**Figura 9.** Gráficos de las curvas promedio de (57) relación de gradiente, (58) relación de gradiente modificado, (59) permeabilidad y (60) gradiente hidráulico de todos los sistemas compatibles de arena aluvial con geotextil no tejido punzonado por agujas y arena aluvial con geotextil tejido de trama inserta.



**Nota:** Las curvas promedio de las demás combinaciones con geotextil no tejido punzonado por agujas, no se presentan debido a que los resultados de los ensayos no mostraron valores de relación de gradiente modificado entre 1 y 3. Por lo tanto, se estableció que dichas combinaciones no se desempeñaban adecuadamente bajo los requerimientos de filtración.

## 7 Conclusiones

- Los procedimientos que se describen en la norma ASTM D 5101-90 para realizar la prueba estandarizada y controlada del ensayo de relación de gradiente, usada para medir el potencial de colmatación de un sistema suelo-geotextil, se llevó a cabo mediante la elaboración de un permeámetro de cabeza constante, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM D 5101-90 y según *Evaluation of geotextile filter behavior using the gradient ratio test*. Los resultados obtenidos en los ensayos efectuados en esta investigación, con algunos suelos de la Sabana de Bogotá, con geotextiles de producción nacional, son consecuentes con los resultados de ensayos practicados en investigaciones anteriores en el mundo. Prueba de esto son: los procesos experimentados por cada sistema, partículas que se mueven hacia el geotextil produciendo su obstrucción o colmatación, una fase de tubificación y la formación de la capa filtrante, procesos descritos y estudiados previamente por *Rollin* (1985); los valores obtenidos de relación de gradiente entre 1 y 3, por medio de los cuales se infirió la compatibilidad de los sistemas suelo-geotextil, parámetro establecido por Haliburton y Wood (1982), Robert G, Carrol Jr. (1987), FHWA (1986) y la ASTM (1990); el comportamiento de los compuestos suelo-geotextil a través del tiempo (relación de gradiente, permeabilidad y gradiente hidráulico), similar al de ensayos ejecutados por Dave Chang y Yu-Chen Nieh (1993); la estabilización del flujo atribuida a la formación del *filter cake* o *bridge network* en la interfase del sistema, suceso observado en trabajos realizados por N. John y P. Watson, 1996; el comportamiento similar de las curvas de relación de gradiente modificado, con las que se advirtieron las pérdidas de energía del flujo en la interfase suelo-geotextil, aspecto investigado por Fannin, Vaid y Shi, 1996 y Dave Ta-The Chang, Chiwan Hsieh, Chen Shih-Yueh y Chen You-Quan (2000). De este modo, se puede establecer que los datos recopilados y hallados son congruentes y confiables, razón por la cual se puede establecer que el permeámetro de cabeza constante elaborado en esta investigación, puede ser usado y tiene validez para aplicar la metodología de ensayo que describe la Norma ASTM D 5101-90, para evaluar el potencial de colmatación de otros sistemas que involucren diferentes suelos y otros geotextiles en futuros estudios.
- La importancia de los datos recopilados en esta investigación radica en evidenciar el desempeño de un sistema suelo-geotextil, que no es el deseado ni el previsto por los diseñadores en los diferentes proyectos. Lo anterior conlleva a la necesidad de implementar el ensayo experimental de la relación de gradiente y a la conveniencia de usar los resultados de este trabajo, como base para desarrollar investigaciones que permitan la optimización de futuros proyectos.
- Las arenas aluviales gruesa, gruesa+media, media, media+finas, finas y gruesa+media+finas fueron

---

7 FANNIN, Jonathan, VAID, Yoginder P., SHI, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canadá 1.996, quienes implementaron 6 nuevos pares de piezómetros y un dissipador de energía para optimizar los resultados.

---

las muestras de suelo que se emplearon como parámetro en la investigación, ya que se incrementó paulatinamente el contenido de finos, logrando así la calibración del permeámetro. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, permitieron evaluar el potencial de colmatación de cada sistema. De esta manera, se distinguió el desempeño filtrante de acuerdo a las condiciones del suelo y al tipo de geotextil.

- El geotextil tejido de trama inserta exhibió un desempeño superior con respecto al geotextil no tejido punzonado por agujas ante los requerimientos de filtración y retención (véase tabla 4). Lo anterior conduce a establecer que el comportamiento de los geotextiles es inherente a las propiedades otorgadas de acuerdo al método textil de elaboración. Por lo tanto, es importante comparar los geotextiles no solo de acuerdo a las funciones principales especificadas por algunas agencias u organismos de control, sino de acuerdo al método textil de elaboración.
- Se reconocieron las condiciones más favorables bajo las cuales la colmatación disminuye. Para ello se tuvo presente los resultados de RG, RG mod., permeabilidad y gradiente hidráulico simultáneamente. Teniendo en cuenta lo referido en la tabla 4, se destaca la conveniencia de propiciar en la interfase la formación del *Bridge network*, el cual se genera en los suelos bien gradados. La formación de dicha capa filtrante permitió interceptar las partículas más finas, evitando la tubificación del suelo, y la consecuente colmatación aceleró el proceso de estabilización del compuesto y aseguró su óptimo desempeño. Resulta apropiado precisar que todas las ventajas proporcionadas por los suelos bien gradados se deben a una mejor acomodación de sus partículas y a la disminución de vacíos entre ellas, características que ayudan a restringir su movimiento interno, y favorece la estabilización del flujo. Otros parámetros que favorecen la disminución de la colmatación de un sistema suelo-geotextil son la condición no plástica de los suelos y el tipo de fabricación tejida de los geotextiles. Como consecuencia del análisis detallado de cada uno de los parámetros mencionados, se estableció la compatibilidad de los sistemas.
- Aunque el sistema de arena gruesamedia + fina con GTXL-NT presentó condiciones de filtración aceptables, el óptimo desempeño lo mostraron las combinaciones de arena aluvial media, media + fina, fina y gruesa + media + fina con GTXL-TTI (toman menos tiempo en encontrar su equilibrio interno). Así se consideran las combinaciones con GTXL-TTI mencionadas, como muy buenos materiales drenantes, aptos para la construcción de rellenos controlados como sub-drenes laterales de carreteras, drenes en muros de contención y control de erosión de taludes, diques y canales.
- Para obtener valores óptimos de relación de gradiente, flujo uniforme y estabilidad del sistema, que es lo que realmente se necesita en la construcción de sub-drenes laterales, estructuras de contención y revestimiento de taludes o diques, se deben conocer las especificaciones geotécnicas del suelo a emplear, las características del proyecto y las funciones para las cuales se espera que trabaje el geotextil y funcione correctamente y, por supuesto, el comportamiento de todo el sistema suelo-geotextil. En la práctica de la ingeniería nacional siempre se ha mantenido el concepto de trabajar con la información técnica suministrada por los proveedores de geosintéticos, información en algunos casos bastante confusa y, por lo general, parcializada ya que se está buscando desarrollar proyectos con fines comerciales, dejando a un lado los proce-

sos de calidad y rigurosas metodologías de diseño que se logran con investigaciones, aplicación de modelos y estadísticas de acuerdo a las funciones para las cuales se requiere que el geosintético trabaje. Así, por medio de este proyecto se pudo demostrar que si es posible implementar metodologías que contribuyan al desarrollo y mejoramiento de obras civiles que involucren geotextiles con aplicaciones filtrantes, sin necesidad de recurrir a alta tecnología ni herramientas demasiado sofisticadas que impidan llevar a cabo nuevas investigaciones.

- Aunque se necesite una investigación más profunda, los datos condensados en la tabla 4, arrojan como resultado que los mejores geotextiles para optimizar la filtración de un sistema suelo-geotextil son los geotextiles tejidos de trama inserta. Sin embargo, aunque sea necesario realizar un estudio más exhaustivo del tema, esta afirmación se basa en los documentos de los diversos congresos de geosintéticos<sup>8</sup> que se han analizado para respaldar esta investigación.

## 8 Recomendaciones

- Se recomienda que se realice una continuación de la investigación en la cual se disponga de una

mayor altura para que sea posible imponer gradientes hidráulicos más elevados, utilizar un tiempo más prolongado de ensayo e involucrar un mayor número de ensayos por cada combinación y, así, determinar con mayor precisión las variaciones de la relación de gradiente modificado y permeabilidad del sistema.

- En futuras investigaciones se aconseja determinar el comportamiento de un solo suelo con varios geotextiles o varios suelos con un solo geotextil para poder establecer una estadística y conclusiones más certeras acerca de los requerimientos mínimos de filtración de los sistemas suelo-geotextil. También sería útil incluir ensayos con otro tipo de suelos no necesariamente de la Sabana de Bogotá, tales como arcillas o lutitas.
- Se sugiere tener en cuenta la metodología descrita en la norma ASTM D 5101-90 en esta investigación y a los documentos referidos en la bibliografía para la ejecución de próximos ensayos, ya que otros documentos como la norma Icontec suprime algunos aspectos y procedimientos importantes para el buen desempeño de la prueba de relación de gradiente.

---

8 Referencias bibliográficas 1, 2, 3, 5, 8, 12 y 15.

## Bibliografía

- ASTM D5101-90 (1990). "Standard test Method for measuring the soil-geotextile system clogging potencial by the gradient ratio".
- BRADY, K.C, WATTS, G.R.A "Geotextile durability: current situation regarding test methods and standards". Reino Unido: Transport Research Laboratory.
- BORDIER C. y ZIMMER D. (1996). « Influence of clogging on drainage performances of granular and geosynthetic drainage material ».
- CARROLL Robert G. Jr, (1987). *Hydraulic Properties of geotextiles*. Filadelfia: American Society for Testing and Materials, pp. 7-20.
- CAZZUFFI, D. MAZZUCATO, A., MORACI, N. TONDELLO, M. (1996). "A new test apparatus for the study of geotextiles behavior as filters in unsteady flow conditions".
- CHANG, Dave Ta-The, NIEH Yu-Chen. "Significance of gradient ratio test for Determining Clogging Potential of Geotextiles". Recent developments in geotextile filters and prefabricated drainage geocomposites, ASTM STP 1281.
- CHIN, Yaw Ming y NIKRAZ, Hamid (1996). "An empirical approach to filtration criteria for non-woven geotextiles".
- DAVE Ta-the Chang, CHIWAN, Hsieh, CHEN Shih-Yueh y CHEN You-Quan (2000). "Review Clogging behavior by the modified gradient Ratio test device with implanted piezometers". En: *Geotechnical Testing Journal*, Vol 17, No 1.
- DIERICKX, Willy. "Determination of water penetration resistance of geotextiles". Recent developments in geotextile filters and prefabricated drainage geocomposites, ASTM STP 1281.
- FANNIN, Jonathan, VAID, Yoginder P., SHI. "Evaluation of geotextil filter behavior using the gradient ratio test". University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canadá V6T 1Z4.
- FANNIN, Jonathan, VAID, Yoginder P., SHI, Yucheng (1994). "Interpretation of gradient ratio test results". En: *Fifth international conference on geotextiles, geomembranes and related products*. Singapore, 5-9. Septiembre.
- FISCHER, Gregory R., MARE, Andre D. y HOLTZ Robert D (1999). "Influence of procedural variables on the gradient ratio test". En: *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol 22, March, pp. 22-YUCHENG (1994). "A Critical Evaluation of the Gradient Ratio Test". En: *Geotechnical Testing Journal*, Vol 17, No 1, March.
- FISCHER, Gregory R., MARE, Andre D. y HOLTZ Robert, BARRY Christopher, R. *Evaluating Geotextile Pore Structure*. Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites, ASTM STP 1281.
- FROBEL, Ronald, WERNER, Gerhard y WEWERKA, Manfred (1987). *Geotextles as filters in erosion control'*.
- GERARD P.T.M Van Santvoort "Geotextiles and geomembranes in civil engineering".
- GRAB, M.A y AKRAM M.H. (1996). "Retention and permeation of fly ash with non-woven geotextiles".
- JOHN y WATSON, J. (1996). "Soil particle bridge development at the soil-geotextile interface".
- KOERNER, Robert y BOVE, John (1987). *Lateral drainage designs using geotextiles and geocomposites*.

- KOERNER, Robert, R. M., WILSON-FAHMY, R. F., "Field Performance of Geosynthetic Highway Drainage Systems". Recent developments in geotextile filters and prefabricated drainage geocomposites, ASTM STP 1281.
- KOERNER, Robert, WEISH (1988). *Construction and geotechnical engineering using synthetic fabric*. United States
- \_\_\_\_\_, "Designing with geosynthetics".
- PALMEIRA, E.M, FANNIN, Jonathan, VAID, Yoginder (1996). "A study on the behavior of soil-geotextile systems in filtration test". Julio 15.
- PALMEIRA, E.M, FANNIN, Jonathan, VAID, Yoginder (1996). "A modified gradient ratio test device".
- RAYMOND, G.P., BATHURST, R.J, HAJEK J. "Evaluation of geocomposite edge drain on sand subgrade". Queen's University, Royal Military College of Canada, Ministry of Transportation of Ontario.
- SHOBHA K. Bhatia, SUITS David (eds.). *Recent developments in geotextile filters and refabricated drainage geocomposites. Filters In geotechnical and hydraulic engineering*. Alemania: J. Brauns & U. Schuler Institute of soil Mechanics, Univesity of Karlsruhe, Germany.
- \* Research needs in geotextile filter design
  - \* A critical review of geotextiles pore size measurement methods
  - \* Geotextile filter behaviour with critical filtration conditions.
- SPENCE, Dundee. "The hydraulic properties of geosynthetic products". Reino Unido: Institute of Technology.
- SUITS L. David, HOOVER Thomas P. (1987). *Geotextiles and Drainage*. Filadelfia: American Society for Testing and Materials, pp. 21-32.

# CREACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS EN LA INTERFERENCIA DE MÚLTIPLES HACES

Freddy Monroy y Lyubov Kreminskaya<sup>1</sup>

## Resumen

En esta investigación se muestra teórica y experimentalmente que los vórtices ópticos se forman en la múltiple interferencia de tres o más ondas planas. Los vórtices son localizados a lo largo del eje de propagación de la luz con el diseño transversal deseado.

## Palabras clave

Vórtice, interferencia, haz láser.

## Abstract

We have shown both theoretically and experimentally that optical vortices are formed in multi-beam interference of three and more plane waves. Vortices are located on lines along the axis of light's propagation with the desirable transverse design.

## Key words

Vortex, interference, laser beam.

---

<sup>1</sup> Vinculados al Centro Internacional de Física. Freddy Monroy está vinculado al Departamento de Ciencias Básicas de la USTA. Correo electrónico: [freddymonroy@correo.usta.edu.co](mailto:freddymonroy@correo.usta.edu.co).

---

## Introducción

La luz vista como una onda electromagnética posee dos características principales: intensidad y fase. La intensidad es el módulo al cuadrado de la amplitud compleja del campo electromagnético, y la fase es aquella superficie en el espacio por donde viaja la luz, conformada por todos los puntos de un mismo frente de onda o puntos equifásicos. Un vórtice óptico o singularidad óptica es aquella región del espacio por donde viaja la luz en donde se presentan simultáneamente las dos siguientes características: la amplitud compleja del campo electromagnético es exactamente igual a cero (es decir, intensidad de la luz es igual a cero) y la fase presenta una indeterminación; en ese sitio la fase presenta una superficie de hélice alrededor del vórtice, con salto de  $\pm 2\pi n$  durante una vuelta; donde  $n$  es la carga topológica.

El problema de la formación de los vórtices ópticos ha sido de interés en los últimos 25 años [1], debido a su amplia perspectiva de aplicabilidad, tales como poder generar en el nivel microscópico regiones de intensidad nula y fase aleatoria que sirven para "encerrar" cuerpos no cargados eléctricamente y así, utilizar esta región como "trampas ópticas" o "pinzas ópticas" y facilitar su manipulación. Entre otras, se encuentran aplicaciones también en la astronomía, en donde en ocasiones se requiere visualizar regiones de alta intensidad que saturan el ojo del observador, para esto se acondiciona al telescopio el dispositivo necesario para ubicar un vórtice óptico en el centro del objeto a observar y así visualizar su contorno [1]. Es posible obtener vórtices ópticos haciendo que un haz láser pase a través de cristales, soluciones líquidas o vapores de materiales con no linealidades, guías de onda, hologramas, transductores o haces láser con modos Laguerre-Gaussianos diferentes de cero, etc.

Otra forma de obtener vórtices ópticos es por medio de la interferencia de múltiples haces en una

misma región del espacio. Por medio de un interferómetro tipo Mach-Zehnder se pueden hacer interferir dos o más haces planos (un haz plano es aquel cuya fase es una superficie plana), pudiéndose controlar con facilidad el ángulo entre ellos, con lo cual se puede obtener la configuración geométrica deseada de las franjas de interferencia, obteniendo así las regiones de intensidad nula y fase indeterminada.

En este artículo se presentan los resultados de la obtención experimental de los vórtices ópticos en la interferencia de tres o más ondas planas, predicho en [2], obteniendo los patrones de interferencia pertinentes y reconstruyendo la fase en los sitios de localización de las singularidades ópticas.

De otra parte, la interferencia de múltiples haces es significativa desde el punto de vista de la grabación litográfica de rejillas de difracción de alta calidad [3,4], debido a la exactitud con que se pueden ubicar los vórtices ópticos por el fácil control del ángulo entre los haces.

## Conceptos teóricos

Una onda plana está descrita por la ecuación:

$$U = U_0 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (1)$$

Donde  $U$  es la amplitud compleja del campo,  $U_0$  es la amplitud del campo,  $k$  es el vector de onda, que indica la dirección de propagación de la onda,  $r$  es el vector posición en el espacio. Una onda plana con un ángulo de inclinación, en el plano  $z = 0$  se define como:

$$U(x, y, 0) = U_0 \exp(ik[\alpha x + \beta y]) \quad (2)$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  son los ángulos (en radianes) de inclinación de la onda con respecto a los ejes,  $x$  y  $y$  (independientes de  $z$ ), coordenadas perpendiculares a la

dirección  $z$  de propagación de la onda.

El campo electromagnético de una onda plana, cambia durante su propagación en el espacio libre en aproximación de Fresnel [5] según la ecuación:

$$U(x, y, z) = U_0 \exp\left(ik \left[ \alpha x + \beta y + z - z(\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} \right]\right) \quad (3)$$

En el caso de la interferencia de dos ondas planas de igual amplitud  $U_0$  en las direcciones, se obtiene el campo complejo dado por  $U_{ij}$ :

$$U_{ij} = u_i \exp(ik_i r) + u_j \exp(ik_j r) = 2u_0 \exp\left(ir \left[ \frac{k_i + k_j}{2} \right]\right) \cos\left(ir \left[ \frac{k_i - k_j}{2} \right]\right) \quad (4)$$

Donde el término cosenoidal es el culpable de la estructura periódica de franjas oscuras y claras, típica de la interferencia entre dos ondas planas.

Si las amplitudes son iguales, el contraste de la imagen es igual a uno (contraste óptimo) y bajo cualquier sección transversal de una franja oscura, toma lugar un cambio de fase de  $\pi$  radianes.

Tradicionalmente las estructuras formadas son llamadas dislocaciones ilimitadas de borde (o vórtices ilimitados de borde), parte real e imaginaria del campo igual a cero. Sin embargo, estas estructuras son ilimitadas no solo en la sección transversal, sino también en la sección longitudinal, formando un conjunto de planos a lo largo del eje  $z$ , corridos en  $\pi$  radianes uno respecto al otro.

Este estamento es previsto en la ecuación (3), donde los coeficientes de  $x$ , y no dependen de  $z$ .

La adición de una tercera onda con un ángulo distinto elimina estos planos, formando líneas rectas a lo largo de las cuales existen los vórtices ópticos. El campo total es la superposición de los tres sistemas de franjas que se están interfiriendo:

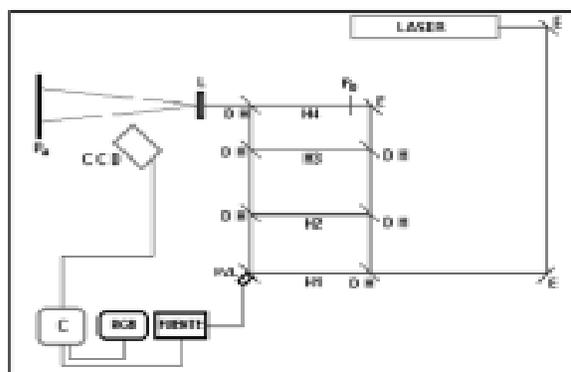
$$U_{\Sigma} = \frac{1}{2} (U_{12} + U_{23} + U_{13}) \quad (5)$$

Donde  $U_{ij}$  corresponde al campo obtenido al superponer las ondas  $i$  y  $j$ , para  $i, j = 1, 2, 3$  y  $U_{\Sigma}$  es el campo total.

## Montaje experimental y equipo utilizado

Para estudiar el patrón de interferencia entre tres haces planos, se estudia la intensidad y la fase por un método indirecto.

El montaje utilizado fue el del interferómetro de Mach-Zehnder ( $MZ$ ) modificado con cuatro brazos, ubicando un piezoeléctrico (PZL) por detrás del espejo de uno de sus brazos (con la finalidad de hacer los corrimientos de fases, necesarios para hacer la reconstrucción de fase por uno de los algoritmos típicos para este fin) y utilizando este brazo como haz de referencia, la interferencia a estudiar es entre los otros tres haces.



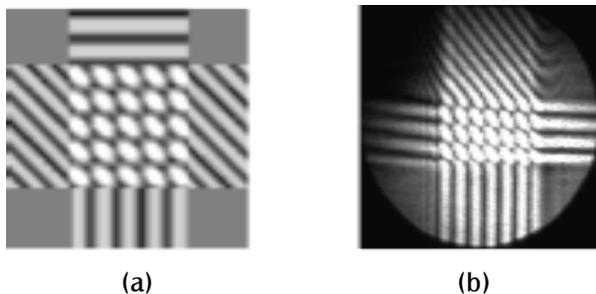
**Figura 1.** Interferómetro de Mach-Zehnder modificado, con 4 brazos y un piezoeléctrico unido a uno de los espejos

Con este montaje se obtienen patrones de franjas entre los diferentes haces, tal que la frecuencia y orientación de las franjas depende del ángulo entre los haces.

## Discusión

En la interferencia de los tres haces, los diferentes campos son formados dependiendo de la disposición mutua de las ondas interfirientes (por ejemplo, de los ángulos entre las ondas), comenzando por franjas periódicas (interferencia entre dos haces), hasta la estructura hexagonal del campo (interferencia entre tres haces). La figura 2(a) muestra la simulación numérica de tres haces interfiriendo, en donde se observan las estructuras periódicas predichas, la figura 2(b) muestra la imagen de intensidad obtenida experimentalmente mostrando una estructura similar. En ambas figuras se observa la estructura hexagonal propia de la región de interferencia entre los tres haces. Es de notar que en los vértices de los hexágonos existen regiones de intensidad nula (puntos oscuros), por lo tanto presumiblemente allí existirán vórtices ópticos.

Al realizar el cálculo numérico de la interferencia de las tres ondas planas dado por la ecuación (4) (figura 2(a)), se obtiene la misma imagen de distribución de intensidad, con intensidad cero en los vértices de las celdas hexagonales.



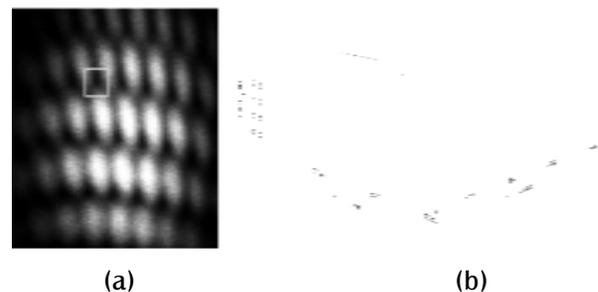
**Figura 2.** Imágenes de distribución de intensidad del campo total de las tres ondas planas (centro) y

patrones de dos ondas planas (arriba, abajo y a los lados):

(a) Imagen obtenida teóricamente (b) Imagen obtenida experimentalmente.

La distribución de fase, prueba la existencia de los vórtices ópticos, cada uno de ellos acompañado por un punto de silla (auto cruce de líneas de equifase), con cambio de carga topológica en las vecindades de los vórtices de menos uno a más uno (al pasar por un vórtice, la fase salta y cambia en  $\pm 2\pi$ ).

Seleccionando como región a estudiar un vértice de un hexágono, utilizando el PZL para hacer los corrimientos de fase controlados, y utilizando el algoritmo de los cuatro pasos para reconstrucción de la fase, se obtuvo el mapa de fase, encontrando un salto de fase que muestra la existencia de un vórtice óptico en este punto.



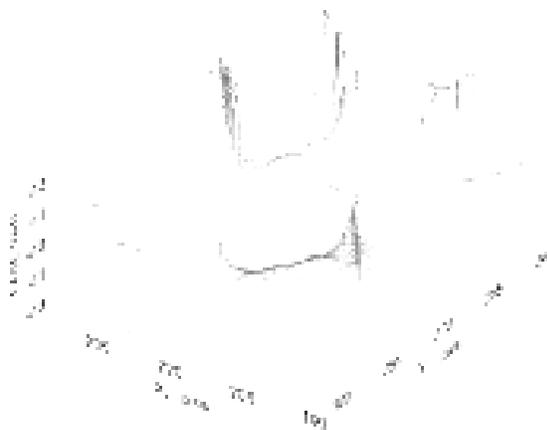
**Figura 3.** Imágenes obtenidas experimentalmente (a) intensidad de la interferencia de tres haces, donde se ha seleccionado un vértice de un hexágono (b) mapa de fase obtenido del estudio del área seleccionada, donde se observa claramente el salto de fase en el sitio de la dislocación

De la misma forma, seleccionando como región a estudiar dos vértices de un hexágono y obteniendo el mapa de fase correspondiente, se observa un vórtice óptico en cada vértice, pero con orientaciones alternadas, tal que la carga topológica es cero.

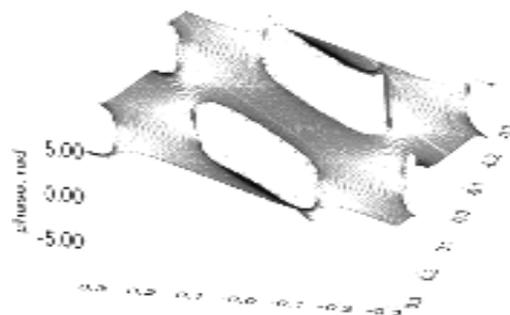


**Figura 4.** Mapa de fase obtenido experimentalmente seleccionando un área que abarca dos vértices de un hexágono, se observan las dos dislocaciones, una en cada vértice y con orientaciones contrarias.

De la misma forma, seleccionando como región a estudiar un hexágono completo y obteniendo el mapa de fase correspondiente, se obtiene una dislocación en cada vértice del hexágono, pero con orientaciones alternadas, tal que la carga topológica nuevamente es cero.



**Figura 5.** Mapa de fase obtenido experimentalmente no completo. Se observan las dislocaciones, una en cada vértice del hexágono.



**Figura 6.** Mapa de fase obtenido teóricamente seleccionando un área que abarca un hexágono completo, se observan las dislocaciones en cada vértice del hexágono y un punto de silla en cada vértice.

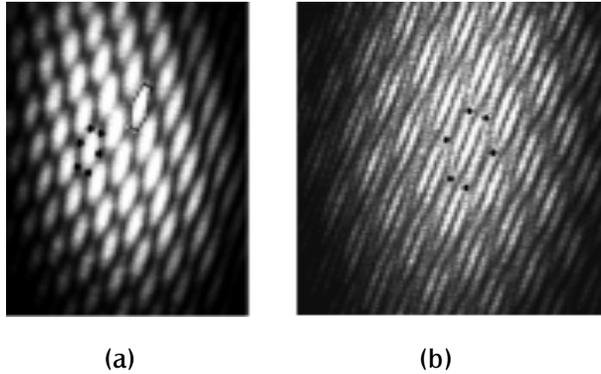
Si se observa el comportamiento de los vórtices ópticos a lo largo de la propagación de la luz, se encuentra que el conjunto de puntos de los vórtices están en línea recta a lo largo del eje de propagación de la luz.

En una sección transversal la estructura hexagonal es regular para iguales valores de ángulos de incidencia entre las ondas planas, si los ángulos son diferentes, los hexágonos son deformados o degenerados.

Cuando los ángulos entre las ondas son grandes, los hexágonos son pequeños y viceversa. De esta forma se ha obtenido un vórtice cuando las ondas planas interfirientes forman entre sí ángulos muy pequeños.

Otra forma de mostrar la existencia de una estructura de vórtices de este campo, es añadiendo una cuarta onda plana, orientada un ángulo más grande relativo a los ángulos entre las otras tres ondas planas. Se evidencia la existencia de un vórtice óptico en aquellas regiones donde las franjas sufren bifurcaciones. En la figura 7 se muestra la presencia de un doblado de franjas (bifurcaciones) en los vértices de los hexágonos en el patrón de intensidad. La

orientación de las bifurcaciones es alternativa dentro cada celda hexagonal, esto es: la carga topológica total es igual a cero.



**Figura 7.** Resultados experimentales de varias ondas planas interfiriéndose: (a) tres ondas planas interfiriéndose, se ha seleccionado un hexágono para observar los vórtices ópticos en sus vértices, (b) se

ha agregado una cuarta onda plana con una frecuencia de franjas mayor a los demás. Se muestran los vórtices ópticos en los vértices de los hexágonos con cargas topológicas alternadas.

## Conclusiones y resultados

- Por un método indirecto se ha reconstruido la fase del campo resultante de la interferencia de varias ondas planas, mostrando con los saltos de fase, la estructura de vórtices del campo.
- Cada vórtice se ubica en el vértice de un hexágono y es acompañado por un punto de silla.
- Es posible obtener una estructura transversal de diferentes formas (y, por lo tanto, diferentes disposiciones de los vórtices ópticos), cambiando los ángulos entre los haces.

## Bibliografía

COOPER S., TOMKINS D., PETTY M. (1997). *Surface-relief diffraction gratings by multiple-beam coherent phase exposure* *optics letters*. 22, 357-359.

FERNANDES A., PHILION D. (1998). *Effects of phase shifts on four-beam interference patterns* *Applied optics*. 37, 473-478.

GOODMAN J. W. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill international Editions, segunda edición, p 63.

NYE J. F., BERRY M. (1974). *Dislocations in wave trains*. *Proc. Roy. Soc. Lond A* 336 165-190.

ROZANOV N. (1993). *About formation of radiation with dislocations of wavefront*. *Optica & Spektroskopia* 74 861- 867 (in russian).