

# SEGUIMIENTO A PATÓGENOS PRESENTES EN BIOSÓLIDO EMPLEADO COMO ENMIENDA PARA REVEGETALIZAR UN TALUD

Idalia Jacqueline López Sánchez\*  
Diana Rocío Acevedo Cifuentes\*\*  
Carlos Andrés Ordóñez Ante\*\*\*

Recibido: 01/12/2009

Aceptado: 08/10/2010

## RESUMEN

Con el fin de evaluar la factibilidad del uso del biosólido como enmienda orgánica para el establecimiento de vegetación y el control de procesos erosivos superficiales activos, se seleccionó un corte de carretera ubicado sobre la Variante a Caldas (Antioquia). Para darle amarre y cobertura al suelo, se sembraron dos especies vegetales tipo pasto *Brachiaria Decumbens* y Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), utilizando biosólido proveniente de la PTAR San Fernando, mezclado con suelo de la zona. Se evaluó el comportamiento de bioindicadores de riesgo ambiental: coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella-Shiguelia*, en las aguas de escorrentía y en el suelo del talud en el tiempo.

Ambas especies se adaptaron bien amarrando el suelo; la cobertura fue total y permanente. Los resultados muestran la factibilidad del uso del biosólido como enmienda. Sin embargo, la permanencia de los parámetros microbiológicos medidos durante el tiempo de evaluación evidencia la necesidad de sanitizar el biosólido antes de usarlo, ya que estos patógenos constituyen un riesgo ambiental.

**Palabras clave:** *Salmonella*, *Shiguelia*, coliformes, patógenos, biosólido, bioingeniería, enmienda, revegetalización.

---

\* Ingeniera geóloga, magíster en Ingeniería Ambiental, profesora asistente Facultad de Ingenierías Universidad de Medellín. Correo electrónico: ilopez@udem.edu.co.

\*\* Ingeniera química, especialista en Ingeniería Ambiental, profesora de cátedra, categoría C2, Facultad de Ingenierías Universidad de Medellín. Correo electrónico: dracevedo@udem.edu.co.

\*\*\* Ingeniero geólogo, especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones, magíster en Ingeniería- Geotecnia, profesor asociado Facultad de Ingenierías PCJIC. Correo electrónico: caordonez@elpoli.edu.co.

## **FOLLOW-UP TO PATHOGENS PRESENT IN BIOSOLIDS USED AS EMENDATION TO REFOREST A SLOPE**

### **ABSTRACT**

In order to evaluate the feasibility of biosolids use as an organic emendation for reforestation and controlling active superficial erosive processes, a part of the highway -located near to the alternative route to Caldas (Antioquia). With the purpose of preventing erosion, two types of plants *Brachiariadecumbens* and kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) were planted, using biosolids from San Fernando Water Treatment Plant, mixed with soil from the site. The behavior of some environmental risk bioindicators: total coliforms, fecal coliforms, *Salmonella-Shiguella*, were evaluated, in runoff waters and in the slope soil across the time.

Both plant species adapted well to soil; the coverage was complete and permanent. Results show the feasibility of bio-solid as emendation. However, microbiological specifications measured during the evaluation time, showed the need for sanitizing the bio-solid before mixing it with soil, since the presence of these pathogens represents an environmental risk.

**Key words:** *Salmonella-Shiguella*, coliforms, pathogens, bio-solids, bioengineering, emendation, reforestation.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la fase de campo de la investigación; “*Evaluación de la recuperación de un talud degradado empleando biosólidos y técnicas de bioingeniería*”, desarrollado conjuntamente por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y la Universidad de Medellín. Se presentan los resultados relacionados con el comportamiento de los microorganismos patógenos presentes en el biosólido usado como enmienda para sostener las especies vegetales empleada en la recuperación del talud. Este proyecto es de tipo exploratorio, trabajado en campo, donde no es factible controlar todas las variables ambientales relacionadas con el clima, y microecosistemas desarrollados en las especies vegetales seleccionadas.

El control de erosión, con técnicas de bioingeniería, implica el establecimiento y cultivo de la vegetación, cuyas raíces amarran el suelo, lo cubren y protegen de la acción directa de agentes atmosféricos, neutralizando así el avance de dichos procesos y contribuyendo a la estabilización del mismo como se indica en [1]. El biosólido ha mostrado su efectividad en investigaciones anteriores para facilitar el establecimiento de dicha vegetación en suelos degradados e incluso en taludes rocosos como se muestra en [2, 3]. Y se ha empleado en el mejoramiento de suelos por su alto contenido de materia orgánica como se explica en [4].

En la actualidad, en la PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) San Fernando, se generan aproximadamente 28 toneladas base seca por día, y se requiere encontrar un uso ambientalmente seguro a este residuo, lo que evidencia una gran oportunidad para su aprovechamiento como materia prima en el control de procesos erosivos en taludes; sin embargo, es importante evaluar el riesgo microbiológico ambiental, ya que, por generarse a partir del tratamiento de aguas residuales domiciliarias e industriales, este material contiene patógenos y metales pesados, que pueden tener un

efecto adverso significativo en los componentes de medio ambiente (suelo, agua, animales, cultivos, entre otros).

Considerando el riesgo ambiental, se evaluaron los coliformes que han sido usados ampliamente como indicadores de contaminación fecal, ya que están presentes en el tracto intestinal del hombre y en animales de sangre caliente, y se encuentran en grandes cantidades y permanecen por más tiempo en el agua que las otras bacterias patógenas como lo indica [5]. El grupo de los coliformes totales incluye los coliformes fecales y los organismos provenientes del suelo y de la vegetación.

Se evaluó, además, la presencia de *Salmonella-Shiguella*, que aunque no se cuenta con una normativa vigente en Colombia, su presencia y patogenicidad implican un riesgo para la salud que debe ser evaluado.

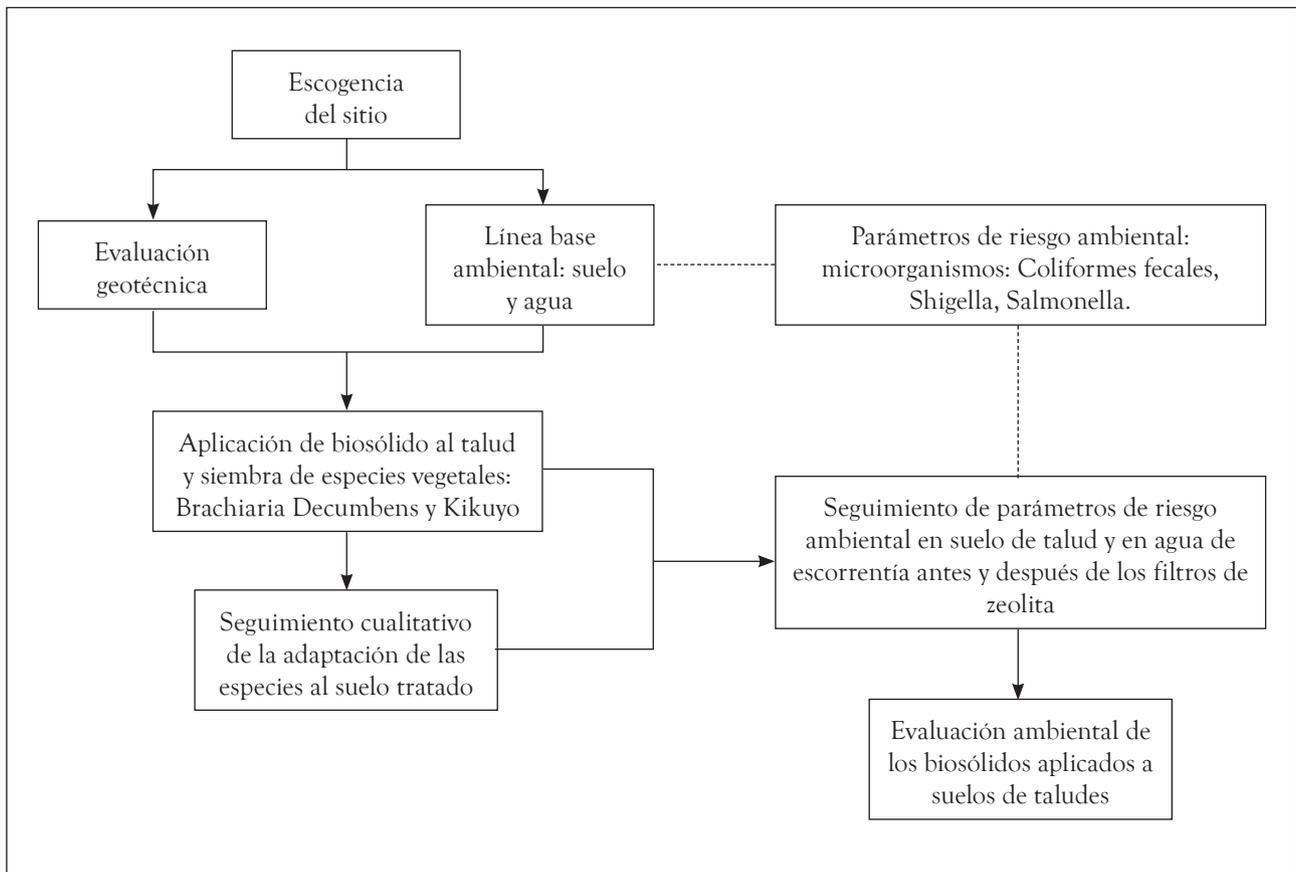
Estos parámetros se evaluaron en el tiempo, tanto en el agua de escorrentía como en el suelo del talud debido a que diversos tipos de microorganismos pueden sobrevivir en las aguas de escorrentía, especialmente si están asociados a sólidos, como los que conforman los biosólidos. En este material el comportamiento de dichos microorganismos es impredecible [6]. Otros estudios han reportado el aumento de las bacterias gran negativas en suelos cuando se han mezclado con biosólidos, grupo en el cual se encuentran los microorganismos patógenos [7, 8].

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la figura 1 (página siguiente) se muestra el esquema metodológico desarrollado.

### 2.1 Selección, adecuación y evaluación inicial del talud

Se seleccionó un talud ubicado en la variante a Caldas, en la cuenca de la quebrada la Zarza, vereda la Corrala, municipio de Caldas, Antioquia.



**Figura 1.** Esquema Metodológico

Fuente: elaboración propia.

El clima en el sitio de estudio presenta períodos de lluvias bimodales, una precipitación promedio de 1.930 mm, una altitud de 1.750 m.s.n.m. y está conformado por suelo residual.

Al momento de iniciar la recuperación, se realizó el perfilaje de la corona y escarpe del mismo; posteriormente, para controlar las aguas de escorrentía, se hizo una cuneta perimetral superior, rodeada de una línea de vetiver para retener sedimentos y disminuir la velocidad del agua que escurriría por el talud como se observa en la figura 2.

Con el fin de conocer las condiciones iniciales del talud, se hizo una caracterización geotécnica, y una caracterización físico-química y microbiológica del suelo y agua de escorrentía. Posteriormente, se realizó una caracterización físicoquímica y microbiológica del biosólido antes de mezclarse con el suelo del talud. Este biosólido se cataloga como

clase B, y es generado a partir de un proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, consistente en un pretratamiento donde se



**Figura 2.** Talud perfilado, con cunetas en las partes superior e inferior y línea de vetiver en la parte superior.

Fuente: elaboración propia.

eliminan los materiales indeseable como basuras e inertes, utilizando rejillas y desarenadores, luego pasa por un proceso de sedimentación primaria y secundaria con aireación; los lodos generados en estos procesos se tratan con un sistema de lodos activados, los cuales finalmente son sometidos a digestión anaerobia.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona, y características propias de las especies vegetales como son el sistema radicular y la adaptabilidad al campo se seleccionaron dos especies de pastos *Brachiaria Decumbens* y Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).

## 2.2 Montaje del ensayo

Una vez caracterizado el talud se procedió a mezclar el biosólido en una proporción 1:1 con el suelo de la zona; durante el proceso de mezclado se le agregaron las semillas de *Brachiaria Decumbens*, y finalmente la mezcla obtenida fue usada para cubrir una superficie de 125 m<sup>2</sup>. De igual forma se procedió con el Kikuyo, el cual se sembró por estolones. De esta forma se tuvieron dos áreas dentro del mismo talud sembradas con dos especies vegetales diferentes.

## 2.3 Seguimiento de los parámetros microbiológicos

Los análisis de seguimiento se iniciaron 30 días después de aplicada la mezcla suelo- biosólido al talud. El período de ensayo estuvo comprendido entre los meses de enero y septiembre de 2008 en el que se realizaron 7 muestreos. Se tomaron muestras de agua de escorrentía de 500 ml en recipientes plásticos para metales, 150ml en recipientes de vidrio esterilizados para las muestras microbiológicas, las cuales se preservaron con hielo, y 1 kg de muestra compuesta de suelo, en bolsas plásticas negras para metales y 50 g de muestra compuesta de suelo, en frascos de vidrio esterilizado tomadas en los primeros 5 cm de suelo con jeringas esterilizadas, para las muestras microbiológicas.

Para el análisis se tuvo como base de comparación o referencia, el decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, mediante el cual se reglamenta parcialmente algunos títulos de la ley 9 de 1979 y otros del decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, en lo relacionado al artículo 38, recurso humano y doméstico y al artículo 40 para uso agrícola.

Con el fin de garantizar la calidad del agua incorporada a los ensayos y no ingresar nuevos patógenos al sistema en evaluación, se hizo un riego artificial con agua potable por un período de 15 minutos antes de dar inicio a los muestreos.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Línea base

#### 3.1.1 Condiciones geotécnicas del suelo

El suelo encontrado correspondió a un suelo arcillo-limoso. En el análisis de estabilidad del talud se encontró que era estable, aunque si se presentara una falla esta sería de tipo rotacional.

#### 3.1.2 Línea base patógenos (coliformes fecales, totales, *Shiguella* y *Salmonella*)

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para el análisis de patógenos antes de aplicar el biosólido al talud a recuperar y los valores de la legislación que se usaron como referencia. En los parámetros coliformes totales y fecales, para el suelo y el agua de escorrentía en la línea base, los valores superaron la norma colombiana [9]; esta contaminación se debe probablemente a que la zona de estudio está abierta y expuesta al paso de animales y humanos que transitan por el sector y pueden hacer aportes. En el agua de escorrentía y suelo de mezcla no se encontró ningún valor para *Shiguella* y *Salmonella*. El biosólido presentó un alto valor, lo que indica un gran aporte de éste patógeno al talud si se aplica el biosólido sin compostar.

**Tabla 1.** Parámetros microbiológicos

Parámetro	Valor referencia para Biosólido clase B en Colombia NMP/g. Norma en estudio	Valor referencia para Biosólido clase B en México y Argentina NMP/g	Valores encontrados en Biosólido PTAR San Fernando aplicado al talud. NMP/g	Suelo de mezcla. NMP/g	Agua de escorrentía. NMP/100 ml	Valor referencia para aguas norma Colombiana. NMP/100ml
Coliformes Fecales	$< 2 \times 10^6$	$< 1 \times 10^3$	$4.4 \times 10^4$	$5.7 \times 10^3$	2000	2.000
Coliformes Totales	-	-	$44 \times 10^3$	$230 \times 10^3$	$9.2 \times 10^6$	$2 \times 10^4$ * $5 \times 10^3$ **
<i>Salmonella-Shiguella</i>	$< 1 \times 10^3$	$< 3$	$1,18 \times 10^7$	0		

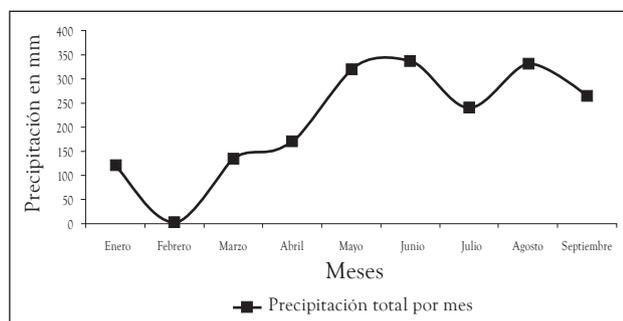
\* Decreto 1594/1984 art. 38 para recurso humano

\*\* Decreto 1594/1984 art. 40 para recurso agrícola

Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Condiciones meteorológicas

La estación pluviométrica de Empresas Públicas de Medellín más cercana a la zona es la estación Caldas, identificada con el código 2701036 y localizada en las coordenadas 828.568 Este y 1.160.480 Norte. En la figura 3 se muestra el comportamiento de la precipitación durante los meses en evaluación.



**Figura 3.** Precipitación media en la zona de estudio (seguimiento, año 2008)

Fuente: elaboración propia.

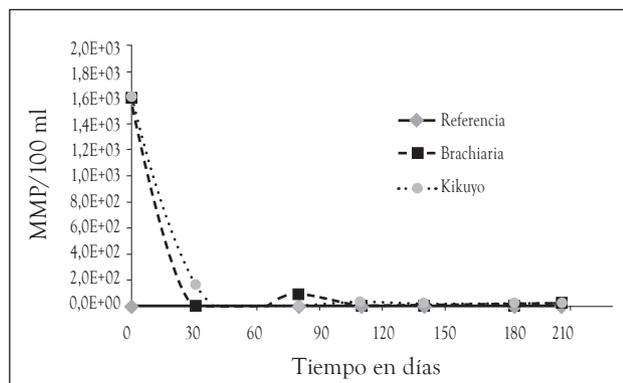
Las precipitaciones en la zona tuvieron influencia en el comportamiento de los parámetros microbiológicos evaluados. En los meses de mayo y junio se tomaron muestras correspondientes a los días 110 y 140 del seguimiento; muestreos en los cuales se presentaron reaflorescencias en los microorganismos medidos. En el mes de agosto

la precipitación promedio fue 10.7 mm y total de 330.7 mm. En este mes no se observaron reaflorescencias, lo que podría indicar que las colonias de microorganismos no lograron adaptarse, para permanecer en el terreno sembrado con las dos diferentes tipos de pastos. Estos datos fueron aportados por el área de Hidrometría e Instrumentación de Empresas Públicas de Medellín.

En términos generales se observó que los microorganismos evaluados tienden a disminuir en el tiempo para los coliformes totales y fecales en suelo y agua de escorrentía, y a desaparecer para *Salmonella-Shiguella*. Además, las colonias disminuyen notablemente luego de la aplicación del biosólido con el suelo. Sin embargo, se presentan rebrotes en las épocas asociadas a altas precipitaciones.

### 3.3 Comportamiento de los coliformes fecales en el seguimiento

Como se observa en la figura 4, luego de 30 días de haber colocado la mezcla suelo biosólido sobre el talud, los coliformes fecales en el agua de escorrentía alcanzaron valores de  $1600 \times 10^3$  NMP/100 ml para ambos tratamientos, los cuales correspondieron a los valores más altos hallados durante todo el tiempo de ensayo. Debido a que los valores de línea base determinan que el valor inicial en el suelo fue muy bajo, es de esperarse que



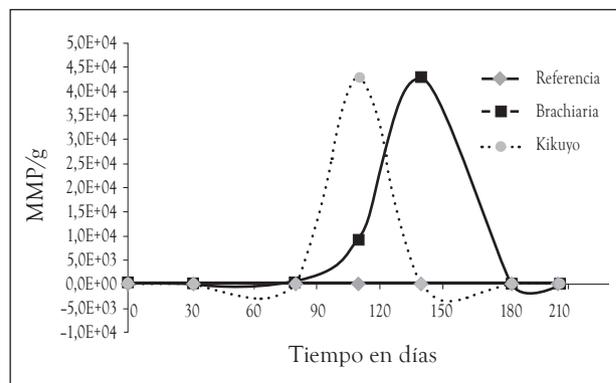
**Figura 4.** Coliformes fecales en aguas de escorrentía

Fuente: elaboración propia.

estos valores se incrementen como consecuencia del aporte microbiológico dado por los biosólidos, como ha sido reportado por [10].

Luego de dar inicio al ensayo, tanto para Kikuyo como para Brachiaria se observó una tendencia acelerada a la baja. Las poblaciones disminuyeron notablemente en tan solo 30 días a valores  $160 \times 10^3$  NMP/100ml para el Kikuyo y  $1,5 \times 10^3$  NMP/100ml para la Brachiaria, lo cual puede deberse a la falta de adaptación de estas poblaciones patógenas a las condiciones del suelo y a los procesos de interacción y competencia a los que se enfrentan con la comunidad microbiana endémica, sin embargo, se presentaron reaflorescimientos (*aumento notable en el contenido de microorganismos*) hacia el día 80 de tratamiento. Esto puede haberse presentado como consecuencia de las altas precipitaciones que se detectaron en este período específicamente. Posteriormente, el comportamiento de estos microorganismos mostró una tendencia a la baja. Es importante resaltar que a pesar de esto, los valores estuvieron por encima de los valores de referencia en el tratamiento con Kikuyo. Para *Brachiaria Decumbens* los valores estuvieron por debajo de la norma, excepto en los días en los que se presentó un reaflorescimiento y reaparece al final del seguimiento.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos en el suelo del talud. En Colombiano se cuenta con una normativa para coliformes fecales;



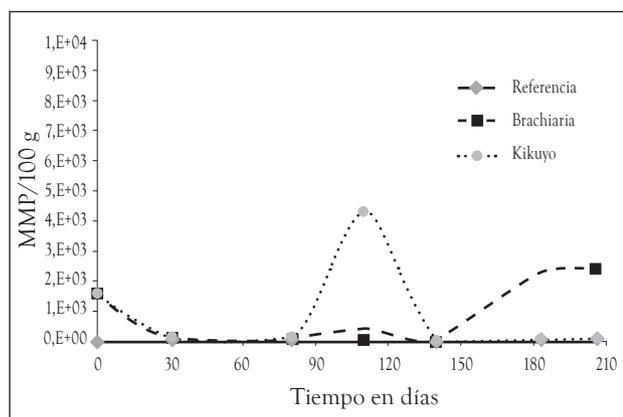
**Figura 5.** Coliformes Totales en suelo del talud

Fuente: elaboración propia.

al parecer el control se ha centrado en la calidad de las aguas de riego y de las enmiendas que se agregan. Por esto se consideró que una buena referencia a tener en cuenta es la CFR-503-40, de la EPA (Environmental Protection Agency). En esta norma los valores límite para coliformes fecales deben ser menores de 1000 NMP/g b.s. para biosólidos clase A y menores de  $2 \times 10^6$  NMP/g b.s. para biosólidos clase B.

En el seguimiento, comparando los tratamientos aplicados con las diferentes especies sembradas, se observa un comportamiento similar en ambos. Los coliformes fecales tienden a estar por debajo de la línea de referencia, pero en casos específicos (días 110 y 140) se presentan reaflorescimientos con valores de  $43 \times 10^6$  NMP/g., para ambas especies.

Estas diferencias en los reaflorescimientos pueden deberse a que en el día 110 la zona sembrada con Kikuyo tenía una microfauna abundante en los agregados que componen el suelo y la precipitación facilitó el lavado de la misma, haciéndola más disponible. Para la *Brachiaria Decumbens*, por tratarse de otra especie vegetal, pueden haberse generado condiciones que permitieron el establecimiento y crecimiento de colonias de fecales en forma diferente al Kikuyo. Por ello, cuando se presentó una alta precipitación en el día 110 posiblemente no contaba con los microorganismos suficientes como para que se reflejara el aumento,



**Figura 6.** Coliformes totales en agua de escorrentía del talud

Fuente: elaboración propia.

pero para el día 140 sí los tenía. En el día 140 las colonias ya habían sido lavadas en el Kikuyo; por ello no se presentó un aumento.

### 3.4 Comportamiento de los coliformes totales en el seguimiento

Al observar la figura 5, se tiene que los coliformes totales en el agua de escorrentía tienden a disminuir inicialmente, pero no desaparecen en el período evaluado, y se mantienen por encima de la norma. Posiblemente porque no sólo son aportados por el hombre y los animales de sangre caliente sino que también pueden provenir del suelo y de la vegetación [11]. Otro de los aspectos negativos del uso de los coliformes totales como indicador es el hecho de que algunos coliformes son capaces de multiplicarse en el agua [12].

Se observa, además, un notable reafloramiento de dichos microorganismos en el área sembrada con Kikuyo, para el día 110, alcanzando un valor de  $4,3 \times 10^6$  NMP/100 ml y se presenta un menor reafloramiento para la Brachiaria Decumbens, con un valor de  $4,3 \times 10^5$  NMP/100 ml en este mismo día, debido a la ocurrencia de lluvias en ese período.

Para los días 183 y 206, con valores de  $2,3 \times 10^6$  NMP/100 ml y  $2,4 \times 10^6$  NMP/100 ml, se observa

un notable reafloramiento de los coliformes totales en el área sembrada con Brachiaria Decumbens, mientras que en el Kikuyo se mantienen bajos  $9 \times 10^4$  NMP/100ml. Esto podría deberse a la influencia de las especies vegetales sobre el desarrollo y sostenimiento de la microfauna.

Para coliformes totales en aguas y suelo, al igual que para coliformes fecales, no se cuenta con normativa ambiental.

En la figura 6 se observa el comportamiento en el suelo de los coliformes totales, que, inicialmente presentaron un aumento en ambos tratamientos y alcanzaron valores máximos en los períodos de mayor precipitación (día 110 para Kikuyo y día 140 para Brachiaria Decumbens), con valores de  $43 \times 10^6$  NMP/g, para ambas especies. Posteriormente los valores muestran un fuerte descenso, aunque estuvieron presentes todo el tiempo con valores por encima de la norma.

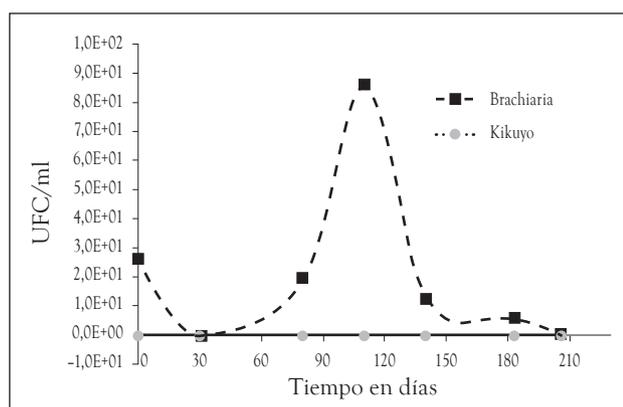
Contrastando las figuras 3 y 5 se observa que el comportamiento de los coliformes totales y fecales en el suelo es muy similar para la Brachiaria Decumbens, con reafloramientos en el día 140, y con valores muy similares, lo cual no se observó en el Kikuyo. Esto puede corroborar la inferencia de que las colonias de microorganismos en el Kikuyo se desarrollaron antes que en la Brachiaria y que podrían disminuir más rápidamente.

### 3.5 Comportamiento de la Salmonella-Shiguelia

En la figura 7 se muestra cómo estos patógenos están presentes en la zona cubierta con Brachiaria Decumbens, durante todo el seguimiento, y presentan un aumento notable en el agua de escorrentía en el día 110, con un valor de  $8,6 \times 10^4$  NMP/100 ml, que coincide con un aumento de la lluvia en la zona de estudio, para luego descender, y continuar con una tendencia a disminuir. Contrario a este comportamiento se observa que en el kikuyo, la Salmonella-Shiguelia, permanece con valores muy bajos durante todo el período en el que

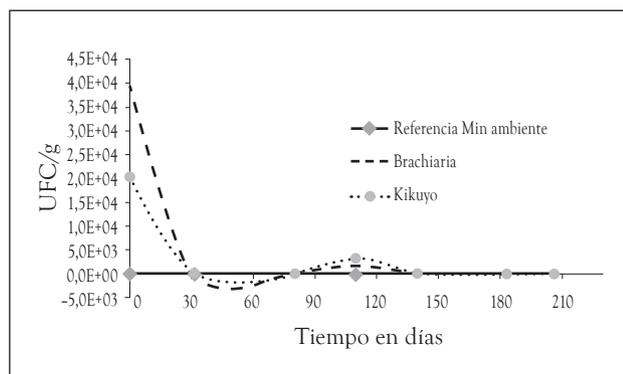
se hizo el seguimiento, por ejemplo para el día 110 se hallaron valores de 24 NMP/100 ml.

En la figura 8, se muestra el comportamiento de este parámetro en el suelo del talud. En los primeros 30 días luego de aplicada la mezcla biosólido suelo (correspondiente al día 0 de la figura), se encontraron valores de  $3.9 \times 10^7$  NMP/g en *Brachiaria Decumbensy* de  $2.1 \times 10^7$  NMP/g, los cuales fueron mayores a los de la línea base. Posteriormente se nota una disminución drástica en ambos tratamientos, con un leve aumento correspondiente al día 110 en el que se presentaron altas precipitaciones en la zona, los valores hallados fueron  $1.7 \times 10^6$  NMP/g para *Brachiaria* y  $3.3 \times 10^6$  NMP/g para *Kikuyo*. La tendencia a la



**Figura 7.** Shiguelia-Salmonella en agua de escorrentía del talud

Fuente: elaboración propia.



**Figura 8.** Shiguelia-Salmonella en el suelo del talud

Fuente: elaboración propia.

disminución es clara, pero se encuentran presentes durante todo el tiempo de muestreo.

Los valores de los patógenos encontrados en las aguas de escorrentía superan la normativa para uso del agua proveniente de vertimientos en Colombia [7] y para uso y consumo humano como en México y Argentina [13, 14] por lo cual se requiere mantener un seguimiento en el análisis de estos parámetros en cualquier caso donde se aplique biosólido a un suelo.

### 3.6. Análisis estadístico

Para determinar si la presencia de contaminantes en un instante de tiempo determinado depende o no del tratamiento que se ha aplicado y con base en la teoría aportada por [15, 16], se realizó una prueba de independencia en cada uno de los diferentes tiempos, de tal manera que se logró determinar si la cantidad de contaminantes en el suelo (o el agua de escorrentía) en un instante de tiempo dado, depende del tratamiento que se le haya aplicado (*Brachiaria* y *Kikuyo*).

Se crearon tablas de contingencia con los datos tomados en cada uno de los diferentes tiempos, tanto para el *Kikuyo* como para *Brachiaria*, y se elaboró un algoritmo que genera dichas tablas para cada uno de los diferentes tiempos en los en que se tomaron los datos. A modo de ejemplo de estas tablas de contingencia, la tabla 2 muestra las frecuencias observadas de los agentes contaminantes en el talud para los tratamientos de *Brachiaria* y *Kikuyo* en el tiempo  $t = 0$ . Se desea entonces contrastar las siguientes hipótesis en cada uno de los diferentes tiempos de medición:

H0: La cantidad de microorganismos evaluados en cada tiempo es independiente del tratamiento aplicado.

H1: La cantidad de microorganismos evaluados en cada tiempo depende del tratamiento aplicado.

**Tabla 2.** Tabla de contingencia en  $t = 0$

TRATAMIENTO EN $t = 0$			
	<i>Brachiaria</i>	<i>Kikuyo</i>	
<b>C. Totales</b>	470	6	<b>476</b>
<b>C. Fecales</b>	470	470	<b>940</b>
<b>SS</b>	39460	20750	<b>60210</b>
	40400	21226	61626

Fuente: elaboración propia.

El análisis de la tabla de contingencia, que nos lleve a contrastar las hipótesis de interés básicamente, cuenta con el supuesto de que los datos obtenidos de las muestras se escogen aleatoriamente. Este supuesto, de acuerdo con el desarrollo de la parte experimental, se satisface completamente. Adicionalmente se recomienda que no todas las frecuencias observadas sean menores que 5, condiciones planteadas en [10], que se satisface.

La tabla 3 presenta los estadísticos calculados con el software elaborado en cada uno de los diferentes tiempos, así como el criterio de rechazar (0) o no rechazar (1) la hipótesis nula. Es importante anotar, que como todas las tablas de contingencia son de  $3 \times 2$ , entonces los grados de libertad para el estadístico de prueba son iguales a 2.

De acuerdo con la tabla 3 se tiene entonces que no hay argumentos suficientes para aceptar la hipótesis nula de independencia ni en agua ni en suelo, es decir, en cada instante de medida se rechaza la hipótesis nula de que la cantidad de microorganismos evaluados en dicho tiempo es independiente del tratamiento aplicado; por lo tanto, se podría afirmar, con un 95% de confiabilidad, que la cantidad de microorganismos evaluados en el tiempo depende del tratamiento que se aplicó.

**Tabla 3.** Resultados arrojados por el algoritmo

Tiempo	Estadístico		Valor	Criterio	
	Suelo	Agua	Critico ( $\alpha = 0.05$ )	Suelo	Agua
0	332,879	691,535	5,991	0	0

31	191,564	509,710	5,991	0	0
80	266,036	109,079	5,991	0	0
110	2979,152	622,650	5,991	0	0
140	590,666	171.729,269	5,991	0	0
183	74,832	537,442	5,991	0	0
206	11,058	681,808	5,991	0	0

Fuente: elaboración propia.

Los valores P, mostrados en la tabla 4, son demasiado pequeños para suelo y agua, lo que significa que se proporcionan suficientes indicios para justificar el rechazo de la aseveración de que la cantidad de microorganismos evaluados en cada tiempo no es independiente del tratamiento aplicado.

**Tabla 4.** Valores p en la prueba de independencia

Tiempo	Valor p	
	Suelo	Agua
0	0	0
31	0	0
80	0	0
110	0	0
140	0	0
183	1,11E-16	0
206	0,00397	0

Fuente: elaboración propia.

### 3 CONCLUSIONES

La aplicación del biosólido mezclado con el limo arcilloso de la zona en proporción 1:1 y las especies *Brachiaria Decumbens* y *Kikuyo* (*Pennisetum clandestinum*), y el control de aguas de escorrentía tuvieron muy buenos resultados con respecto a la recuperación del proceso erosivo. Ambas especies se adaptaron muy bien y sus raíces se densificaron según lo esperado, aportando un buen amarre al

suelo y evitando la generación de nuevos procesos erosivos por gota y laminares

Del análisis estadístico y la observación simple del comportamiento de los datos durante el seguimiento, se puede concluir que la presencia de los microorganismos tanto en suelo como en agua de escorrentía, bajo condiciones de campo, tiende a desaparecer con el tiempo; sin embargo, dada la presencia de rebrotes en momentos de alta precipitación, se considera que es necesario evaluar esta variable en futuras investigaciones, especialmente si el biosólido se aplica sin compostar.

En términos generales, el Kikuyo presentó un comportamiento de descenso más rápido en el tiempo que la *Brachiaria Decumbens* para los patógenos evaluados; por esta razón, posiblemente el Kikuyo presente una mayor ventaja ambiental, ya que al parecer esta especie ofrece una menor adaptabilidad a los microecosistemas desarrollados.

La precipitación presentó una notable influencia en los reaflorescimientos de microorganismos observadas en los diferentes parámetros durante el seguimiento realizado. Se observó una mayor presencia de los microorganismos en los meses en los que se presentó una mayor precipitación, específicamente en mayo y junio. Sin embargo, en el mes de agosto, aunque se presentaron altas precipitaciones, no se observaron mayores reaflorescimientos. Esto podría indicar una tendencia a la disminución y posible desaparición de los microorganismos luego de permanecer en la mezcla suelo biosólido por un tiempo y competir con los microorganismos endémicos, lo que podría viabilizar el uso del biosólido, siempre y cuando estas aguas no se empleen para usos agrícolas y consumo humano

Aunque los resultados obtenidos muestran la disminución en los parámetros de riesgo ambiental medidos durante el seguimiento, se recomienda que, si se requiere recuperar suelos degradados por procesos erosivos utilizando biosólidos provenientes de plantas de tratamiento y teniendo en cuenta

que las legislaciones para uso debiosólidos clase B, en otros países como México y Argentina, que están basados en la misma Norma 40 CFR parte 503 EPA, son más estrictos con respecto a coliformes fecales y *Salmonella - Shiguella*, la norma que se está estudiando para aplicar en Colombia, se debe garantizar la disminución del riesgo ambiental que puede generarse por la presencia de patógenos, lo cual podría lograrse compostando el biosólido antes de aplicarlo.

## REFERENCIAS

- [1] J. Suárez, *Control de Erosión en Zonas Tropicales*, Bucaramanga: UIS. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 2001, pp. 291-391.
- [2] C. A. Ordóñez *et al.*, "Metales presentes en biosólidos empleados como enmienda en un talud recuperado con bioingeniería", presentado a Sexto encuentro nacional e internacional de investigaciones, Medellín, 2008.
- [3] C. A. Ordóñez *et al.*, "Protección de taludes por medio de aplicación de biosólidos provenientes de P.T.A.R", presentado a VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas y XI Congreso Colombiano de Geotecnia, Cartagena de Indias, 2006, vol 1, pp. 291-301.
- [4] D. Carmona, y A. Quinchía, "Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada", *Revista EIA*, no. 2, pp. 89-108, 2004.
- [5] C. Campos, "Indicadores de contaminación fecal en la reutilización de aguas residuales para riego agrícola", Tesis doctoral, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona, Barcelona, 250 p., 1999.
- [6] J. Sidhu, y S. Toze, "Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review", *J. Environmental International* vol. 35, no. 1, pp. 187-201, 2009.
- [7] C. Vargas, *Coliformes totales, termotolerantes y Escherichia coli por el método de filtración de membrana (FM)*, Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2000,
- [8] J. J. Kelly *et al.*, "Assessment of soil microbial communities in surface applied mixtures of Illinois River sediments and biosolids", *Applied Soil Ecology*, vol. 35, no. 2-3, pp. 176-183, 2007.
- [9] *Decreto 1594 de 1984. Uso del Agua y Residuos líquidos*, 1984.

- [10] J. Fuccz *et al.*, “Comportamiento de coliformes fecales como indicadores bacterianos de contaminación fecal en diferentes mezclas de biosólido y estériles utilizados para la restauración”, *Universitas Scientiarum*, vol. 12, no. especial 2, pp. 111-120, 2007.
- [11] N. Romero *et al.*, “Relevamiento de parámetros bacteriológicos en la principal cuenca hidrológica de la provincia de Tucumán - Argentina”, presentado a Primer congreso internacional sobre gestión y tratamiento integral del agua, Córdoba, Argentina, 2006.
- [12] M. Madigan *et al.*, *Biología de los microorganismos*, 8a ed., Madrid: Prentice-Hall, 1997, pp. 971-980.
- [13] *Norma oficial mexicana nom-127-ssa1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*, 1994.
- [14] *Ley 18284 (Código alimentario Argentino) sobre aguas. Artículo 982. Modificado por R 494/94*, 1994.
- [15] Q. W. Daniel, *Bioestadística: Base para el análisis de las ciencias de la Salud*, Ciudad de México: Ed. Limusa, 1979,
- [16] D. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*, Ciudad de México: Ed. Iberoamérica, 1991,