

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL GENERADO POR METALES PESADOS
PROVENIENTES DE BIOSÓLIDOS APLICADOS A SUELOS DE VOCACIÓN
LECHERA DEL NORTE DE ANTIOQUIA.**

ADRIANA PAOLA SOTELO MUÑOZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2009**

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL GENERADO POR METALES PESADOS
PROVENIENTES DE BIOSÓLIDOS APLICADOS A SUELOS DE VOCACIÓN
LECHERA DEL NORTE DE ANTIOQUIA.**

Adriana Paola Sotelo Muñoz

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de QUIMICA

**DIRECTOR
Raúl Zapata, Ph. D.**

Director Escuela de Geociencias

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

**CODIRECTORA
ISABEL BRAVO, M. Sc**
Grupo de Investigación AGROQUIMICA
Universidad del Cauca

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2009**

Nota de Aceptación

Director

Raúl Darío Zapata Hernández Ph. D.

Jurado

Walter Osorio V. Ph. D.

Edier Humberto Pérez. Dr.

Fecha de sustentación:

Ha sido el omnipotente, quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe nuestros pasos.

Ha sido el todopoderoso, quien ha iluminado nuestro sendero cuando más oscuro ha estado,

Ha sido el creador de todas las cosas, el que nos ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer

hemos estado; por ello, con toda la humildad que de nuestro corazón puede emanar,

Dedico primeramente mi trabajo a Dios.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida Familia, por darme la estabilidad emocional, económica, sentimental; para poder llegar hasta este logro, que definitivamente no hubiese podido ser realidad sin ustedes. Madre, serás siempre mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensado. Tu esfuerzo, se convirtió en tu triunfo y el mío, TE AMO.

A todos mis amigos pasados y presentes; pasados por ayudarme a crecer y madurar como persona y presentes por estar siempre conmigo apoyándome en todo las circunstancias posibles, especialmente a Claudia Jiménez Vega por su apoyo incondicional.

A la profesora Isabel Bravo por la confianza y el apoyo durante la realización de mi tesis.

Al profesor Raúl Darío Zapata por dirigir este trabajo con entusiasmo y compartir conmigo no solo sus conocimientos sino su gran Amistad.

A mis compañeros del grupo de Agroquímica, especialmente a Andersson Julián Hoyos por brindarme su amistad y colaboración en todo momento

A los profesores del Departamento de Química de la universidad del Cauca por ayudarme a mi formación profesional.

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín especialmente al Laboratorio de Suelos quienes me apoyaron en el desarrollo del presente trabajo.

A la ing. Marcela Ramírez y a las Químicas Cristina Valencia y Margarita Sizquiarco tres personas que fueron mi apoyo durante este agradable y difícil periodo académico, por ser MIS AMIGOS, y por seguir soportándome y siendo parte de mi vida.

A Claudia Berrio porque gracias a su carácter aprendí a soportar conflictos, problemas y mal entendidos.

Y por supuesto a Don Jorge Arcila, conductor de la Universidad Nacional, a quien no le faltó nunca una palabra de apoyo en mis momentos de desesperación.

LISTA DE ACRÓNIMOS

Al: Aluminio

Ca: Calcio

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

Cd: Cadmio

Cr: Cromo

Cu: Cobre

Fe: Hierro

h: horas

K: Potasio

Mg: magnesio

Meq: miliequivalentes

Mn: Manganeseo

MOF: Materia orgánica fresca

MOH: Materia orgánica humificada

Ni: Níquel

NMP: Numero más probable

Pb: Plomo

Zn: Zinc

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. RESUMEN | 9 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 10 |
| 3. OBJETIVOS | 11 |
| 3.1 Objetivo General | 11 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 11 |
| 4.0 FUNDAMENTO TEORICO | 12 |
| 4.1 Biosólidos | 12 |
| 4.1.1 Calidad De Los Biosólidos | 12 |
| 4.1.2 Clasificación de los Biosólidos | 13 |
| 4.1.2.1 Biosólido Clase A | 13 |
| 4.1.2.2 Biosólido Clase B | 14 |
| 4.1.3 Biosólidos de las plantas de tratamientos de aguas residuales de Colombia | 14 |
| 4.2 Efecto del Biosólido sobre las propiedades del Suelo | 16 |
| 4.2.1 Suelo | 16 |
| 4.2.1.1 Efecto sobre la Materia orgánica | 17 |
| 4.2.1.2 Efecto sobre la Respiración del Suelo | 18 |
| 4.2.1.3 Efecto sobre los Fenómenos de Adsorción - Desorción de metales en el Suelo. | 19 |
| 5. Metodología | 23 |
| 5. 1 Ubicación Geográfica | 23 |
| 5. 2 Selección de Parcelas | 23 |
| 5.2.1 Tratamiento de las parcelas | 24 |
| 5.2.2 Instrumentación instalada en cada parcela | 26 |
| 5.2.3 Análisis Químicos | 27 |
| 5.2.3.1 Metodología para determinaciones Analíticas en Biosólidos | 28 |
| 5.2.3.2 Metodología para Determinaciones Analíticas en Suelos | 28 |
| 5.2.3.3 Metodología para Determinaciones Analíticas en Pastos | 31 |

| | |
|--|----|
| 5.2.3.4 Metodología para Determinaciones Analíticas en Aguas | 33 |
| 5.2.3.5 Metodologías para determinar la adsorción-desorción y la respirometría del suelo | 33 |
| 5.2.3.5.1 Metodología para isothermas de Adsorción- Desorción | 33 |
| 5.2.3.5.2 Metodología para Análisis de actividad respirométrica del suelo | 36 |
| 6. ANALISIS DE RESULTADOS | 39 |
| 6.1 Análisis de Metales Pesados en Biosólido | 39 |
| 6.2. Análisis de Suelos: efecto del biosólido sobre la riqueza agronómica y contenido de metales pesados de los suelos | 39 |
| 6.3 Análisis Foliare: efecto del biosólido sobre la riqueza agronómica y contenido de metales pesados de los patos. | 43 |
| 6.4. Análisis del Efecto del Biosólido sobre el contenido de metales pesados en Aguas. | 45 |
| 6.5 Isothermas de Adsorción- Desorción | 49 |
| 6.5.1. Valoración de los parámetros Para Langmuir (b) y (K). | 51 |
| 6.6 Análisis de de actividad Respirométrica del suelo. | 55 |
| 6.6.1 Valoración de parámetros cinéticos de respirometría | 56 |
| 7. Discusión Global | 59 |
| 8. Conclusiones | 61 |
| Bibliografía | 64 |
| Anexos | 67 |

1. RESUMEN

Hasta el presente es muy poco lo que se conoce, bajo las condiciones edáficas de Antioquia, acerca del efecto de la aplicación directa de los biosólidos sobre los suelos de Antioquia, diferentes estudios permiten conocer su evidente efecto fertilizante sobre algunos cultivos.

Los biosólidos en el proceso de mineralización además de liberar nutrientes para la planta pueden liberar metales pesados que pueden experimentar varios sucesos, precipitar según las condiciones ácido base o formar complejos móviles para su posterior lixiviación o quedar retenidos en la matriz orgánica, diferentes opiniones existen acerca de la contaminación que puede llegar a generar esta aplicación y por esta razón es necesario investigar para tener certeza si la aplicación de biosólidos a los suelos genera su contaminación o la contaminación de cultivos y aguas.

Esta muy bien documentado en la Ciencia del Suelo el efecto que tiene la aplicación de materia orgánica fresca al suelo sobre sus propiedades físicas y químicas. La continua aplicación de esta en el tiempo, hace que disminuya la materia orgánica nativa de suelo afectando su estructura, haciéndolo susceptible a la erosión y degradándolo (Efecto Priming). Los biosólidos son para el suelo, materia orgánica fresca, situación que se refleja en su capacidad fertilizante. Con el tiempo, los biosólidos pueden llegar a degradar los suelos donde se aplican. Es por lo tanto importante saber hasta cuándo y qué cantidad se puede aplicar a un suelo sin deteriorarlo para conservar dicho recurso.

Se busca con esta investigación saber si los biosólidos de la planta San Fernando contaminan las aguas con metales pesados, cual es la capacidad de fijación de estos en los suelos para que no lleguen a las aguas ni a los pastos y observar si con una dosis inadecuada de aplicación se deteriorarían las propiedades de los suelos.

La investigación se llevó a cabo en un suelo de la Finca la Pradera ubicada en la vereda Pio XII del Municipio de Entrerrios, con un lote experimental donde se aplica Biosólidos (parcela experimental) y otro lote testigo donde no se aplica Biosólido (parcela testigo).

En estos se realizaron análisis de suelos, análisis foliares, cálculo de dosis de aplicación con Biosólidos, análisis de metales pesados en suelos, foliares y en muestras de agua de los lisímetros, piezómetros y parcelas de escorrentía, análisis de respirometría y capacidad de adsorción y desorción de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cr) en el suelo testigo aplicado con diferentes dosis de biosólido.

En esta investigación se observó que la fertilización con biosólidos mejora la riqueza agronómica de los suelos y por consiguiente de los pastos allí cultivados. Los metales pesados presentes en los biosólidos aumentan la concentración de metales en el suelo y en el pasto pero no son lixiviados a los cuerpos de aguas, la energía de la adsorción de metales disminuyó por el incremento de dosis de Biosólido aplicado lo que favorece su desorción a la solución del suelo y la absorción por parte de las plantas. El coeficiente de transferencia de los metales pesados a la planta sugiere que los metales más

fácilmente absorbidos por el pasto Kikuyo fueron el níquel y el cadmio. Se encontró la aplicación de biosólidos incrementa la actividad microbial del suelo al punto que su aplicación degrada la materia orgánica nativa de este.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En varios municipios del país se vienen efectuando procesos de tratamiento y transformación de residuos orgánicos e inorgánicos así como de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de comercializarlo e incorporarlo al ciclo económico productivo.

Este hecho se realiza sin un análisis que permita definir su viabilidad y sostenibilidad, entre otras razones porque no existe una norma que permita definir usos benéficos de dichos residuos orgánicos, esta situación origina el impedimento de su comercialización y aprovechamiento en condiciones técnicas. Generalmente, las autoridades ambientales regionales no permiten su incorporación a los suelos por principio de precaución y la comunidad no acepta las calidades y bondades de los bienes producidos con los residuos orgánicos. Esto se considera en muchos casos residuos peligrosos, lo que conlleva a su baja demanda.

Hasta el presente en Colombia no se ha hecho investigación suficientemente profunda y continua sobre el efecto de los biosólidos en suelos y en aguas. Los pocos trabajos realizados (Energie 2001, Dauger 2003, García 2004) solo se pueden considerar estudios preliminares, de los cuales no es posible obtener generalizaciones en el uso de los biosólidos en los suelos de Antioquia. La mayoría de estos estudios han sido a corto plazo y no permiten definir alcances en el tiempo de su efecto por la aplicación en suelos. Igualmente, no se reportan estudios que permitan definir formas, frecuencias y dosis de aplicación de biosólidos a los distintos suelos y cultivos que se tienen en Antioquia, ni existen estudios de la cantidad de metales pesados que se puedan acumular en los suelos bajo pastizales que es donde son aplicados estos biosólidos en forma continua.

Es necesario por lo tanto, identificar si los biosólidos producidos por la Planta San Fernando ejercen algún efecto de acumulación de metales pesados en suelos de Antioquia bajo producción agropecuaria.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la aplicación de biosólidos producidos en la Planta San Fernando sobre la materia orgánica y la acumulación de metales pesados en suelos destinados a producción agropecuaria en el Norte de Antioquia

3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la concentración de metales pesados: Cadmio, Plomo, Níquel, Cromo en muestras de Biosólidos de la Planta San Fernando localizada en el Municipio de Itagüí en los límites con Medellín
- Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos sobre la concentración de metales pesados en muestras de suelos y aguas de escorrentía y lixiviación Municipio de San Pedro Norte de Antioquia,
- Evaluar la retención de metales Cadmio, Plomo, Níquel, Cromo en muestras de suelos y biosólidos mediante Isotermas de Adsorción y Desorción.
- Determinar el efecto del Biosólido sobre la actividad respirometrica microbial del suelo.

4. FUNDAMENTO TEORICO

Las necesidades nutricionales de las plantas normalmente se han suplido mediante adición de fertilizantes inorgánicos y orgánicos al suelo, una alternativa que se está implementando actualmente es la aplicación de Biosólidos, no solamente por sus altos contenidos nutricionales si no por su bajo costo.

Es conocido por todos que el suelo representa un importante recurso natural y por ello la importancia de conocer efectos secundarios generados por la adición de biosólidos. Una revisión de literatura se presenta a continuación acerca de los factores que involucran este hecho. Primero se discute sobre biosólidos producidos en Colombia y a nivel internacional, sus características fisicoquímicas y microbiológicas, seguido a esta revisión se hablará acerca de los posibles efectos de su aplicación sobre algunas propiedades del suelo.

4.1 Biosólidos

Los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores. Gracias a este proceso, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados (Energie).

- **Procesos de estabilización**

Estos tratamientos rinden un producto con una carga microbiana menor y por tanto más adecuada para el manejo y el contacto por parte del hombre. Entre estos procesos cabe citar: la pasteurización, la digestión anaerobia mesófila, la digestión aerobia termófila, el compostaje, estabilización con cal del lodo líquido, almacenamiento líquido, y, deshidratación y almacenamiento. Para determinar el grado de estabilización alcanzado con un determinado procedimiento se utilizan preferentemente dos criterios de estabilización, el del contenido en sólidos volátiles y el de reducción de organismos patógenos indicadores.

Contenido en sólidos volátiles: la cantidad de sólidos volátiles se utiliza comúnmente como un indicador de la cantidad de materia orgánica contenida en el lodo, pudiendo ser utilizado como medida de la efectividad de un tratamiento en la estabilización del componente orgánico del mismo. Este método de medida no es aplicable al caso de los procesos de compostaje y de estabilización con cal.

Reducción de organismos patógenos indicadores: La reducción de organismos patógenos indicadores es importante ya que minimiza los riesgos de infección de la población. Los patógenos típicamente contemplados incluyen virus, bacterias, parásitos y hongos. Digestión anaerobia, compostaje y estabilización con cal llevan a cabo generalmente reducciones de dos órdenes de magnitud. Existen pocos datos relativos a la eliminación de patógenos en procesos típicos de digestión aerobia, aunque cuando dicha digestión se lleva a cabo a elevada temperatura se observan reducciones en el

número de organismos patógenos indicadores de al menos dos órdenes de magnitud. La selección de un determinado proceso de estabilización depende fundamentalmente del destino final reservado al biosólido, eligiendo pues, aquél sistema que da lugar a un producto apropiado al uso o disposición final del mismo. El tratamiento de un lodo es un proceso que generalmente incluye etapas de espesamiento, estabilización, acondicionamiento y deshidratación. Las etapas involucradas en la estabilización son interdependientes, así, por ejemplo, un adecuado espesamiento dará lugar a unas instalaciones de estabilización de menor tamaño, con el consiguiente ahorro económico. A continuación se exponen algunos métodos de estabilización de lodos con sus características más importantes.

4.1.1. Calidad De Los Biosólidos

La calidad y limitaciones de uso de los biosólidos depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales:

- **Metales**

Se considera principalmente zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación suscitan preocupaciones. Los metales están siempre presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones son preocupantes en aguas residuales industriales.

De otro lado, los metales pesados se encuentran de manera natural en la litósfera, hidrósfera y atmósfera en concentraciones tales que por lo general no perjudican las diferentes formas de vida. Sin embargo, los procesos antrópicos han ocasionado un paulatino aumento puntual de dichas concentraciones en los diferentes componentes del edafón (Energie).

- **Nutrientes y materia orgánica**

Su peligrosidad radica en su potencial de eutroficación para las aguas subterráneas y superficiales.

Sin embargo, los biosólidos se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la materia orgánica.

- **Contaminantes orgánicos**

Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos. Todos estos contaminantes son motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el medio ambiente y la salud humana. Una característica de las más importantes es su variado potencial de biodegradación. Muchos se biodegradan

lentamente, por lo tanto los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con tiempos de residencia más largos tendrán una mayor capacidad para biodegradar estos compuestos indeseables. La biodegradación también puede ocurrir después de esparcir los lodos en la tierra o durante el compostaje.

En estudios realizados por el grupo de trabajo de la materia orgánica del suelo sobre el riesgo de los lodos residuales aplicados a suelos, llegó a la conclusión de que la absorción total por el hombre de contaminantes orgánicos procedentes de la aplicación de lodos es poco importante y probablemente no causará efectos adversos para la salud. Sin embargo, a pesar de que cada vez se investiga más el papel ecotoxicológico de los contaminantes orgánicos en el sistema suelo-planta-agua y en la cadena alimentaria, es aún poco claro (Energie).

- **Agentes patógenos**

Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los tremátodos, los céstodos y los nematodos. Los residuos de animales sacrificados o muertos accidentalmente, los desechos hospitalarios y funerarios, entre otros, pueden elevar la carga y la diversidad de patógenos en el lodo.

Para que cualquier vertido de lodos sea seguro, se precisa la eliminación o la inactivación eficaz de estos patógenos, para este fin se puede aplicar una serie de tratamientos tales como la pasteurización, la digestión aerobia o anaerobia, el compostaje, la estabilización con cal, el almacenamiento en estado líquido, la deshidratación y el almacenamiento en seco (Steverson 1982).

4.1.2 Clasificación De Los Biosólidos.

Por su parte, la norma EPA clasifica los biosólidos en:

4.1.2.1 Biosólido Clase A. Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP g⁻¹ de sólidos totales o la densidad de Salmonella sp es inferior a 3 NMP por 4 g⁻¹ de sólidos totales. La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 g⁻¹ de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 g⁻¹ de sólidos totales.

Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas (Energie).

4.1.2.2 Biosólido Clase B. Con una densidad de coliformes fecales inferior a 2 x 10⁶ NMP g⁻¹ de sólidos totales o 2 x 10⁶ UFC g⁻¹ de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola. Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece

límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios. Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio (Energie).

4.1.3.1 Biosólidos de las plantas de tratamientos de aguas residuales de Colombia (PATR)

En la actualidad, Colombia genera diariamente 274 toneladas de biosólidos (94 toneladas base seca). El 97% de la producción es generada por tres plantas (El Salitre, Cañaveralejo y San Fernando) (Dauger 2003).

El control de los biosólidos de las PTAR se basa en el análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Tal como se observa en la tabla los biosólidos de las grandes plantas del país presentan valores de humedad similares; por el contrario, la producción varía dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del caudal afluente.

Tabla 1. Características físicas de las principales PTAR de Colombia (Dauger 2003).

| Parámetro | Biosólidos PTAR El Salitre Datos Sep 2000 –Dic 2002 | PTAR San Fernando (Medellín) Datos de 2003 | PTAR Cañaveralejo (Cali) Datos de 2003 | PTAR Río Frío (Bucaramanga) Datos de 2003 |
|--|---|--|--|---|
| Humedad (%) | 67 | 68 | 66 | 29 |
| Producción Toneladas/día (Base húmeda) | 130 | 80 | 60 | 2 |
| Producción Toneladas/día (Base seca) | 43 | 28 | 20 | 1.4 |

Con respecto a las características químicas, es de resaltar que las concentraciones de la totalidad de los metales pesados analizados en los biosólidos de Colombia se mantienen por debajo de los límites máximos permitidos por las principales regulaciones internacionales. En la mayoría de parámetros están por debajo de las concentraciones promedio de metales pesados de los biosólidos de EEUU y la Unión Europea, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Características químicas de los biosólidos de Colombia y su comparación con biosólidos de EEUU y la UE (Daguer 2003).

| Contaminante mg/kg | Colombia (1) | Brasil (2) | EEUU | Unión Europea(3) | NORMA EPA 40CFR- 503 PC –EQ QUALITY | Límites recomendados Unión Europea 86/278/CEE |
|-----------------------|-----------------|---------------|------|---------------------|--|--|
| Arsénico | 0.47 | 0.1 | 4.9 | Nd | 41 | No regulado |
| Cadmio | 2.78 | 2.3 | 25 | 4 | 39 | 20-40 |
| Cobre | 180 | 138 | 616 | 380 | 1500 | 1000 – 1750 |
| Cromo | 849 | 33.2 | 178 | 145 | No regulado | No regulado |
| Mercurio | 0.85 | 0.1 | 2.3 | 2.7 | 17 | 16-25 |
| Níquel | 65.4 | 12.7 | 71 | 44 | 420 | 300-400 |
| Plomo | 84 | 90.4 | 204 | 97 | 300 | 750-1200 |
| Selenio | 0.46 | 0.1 | 6 | Nd | 100 | No regulado |
| Zinc | 966.3 | 594 | 1285 | 1000 | 2800 | 2500-4000 |

(1). Promedio ponderado de concentraciones en Colombia de las PTAR El Salitre (Bogotá), San Fernando (Medellín), Cañaveralejo (Cali), Río Frío (Bucaramanga), Américas y Comfenalco (Ibagué).

(2) Instituto Agronômico de Campinas (biosólido seco: teor de agua 100 g kg⁻¹; média de duas amostras).

(3) Pollutants in urban waste water and sewage sludge. EU, 2001.

Con respecto a las características agronómicas, los biosólidos de Colombia presentan concentraciones típicas de nitrógeno y fósforo que muestran su alto potencial de aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas (recuperación de suelos, actividades forestales, cobertura de rellenos), tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Características agronómicas de los biosólidos de Colombia (Daguer 2003).

| Parámetros % | Rango Colombia | Biosólidos planta san Fernando Medellín (Colombia) | Rango literatura* |
|--|----------------|--|-------------------|
| Nitrógeno total | 1.6 – 3.3 | 1.8 | 3 – 8** |
| Nitrógeno orgánico | 0.44 – 1.9 | 0.8 | 1 – 5 |
| Nitrógeno amoniacal | 0.6 – 2.3 | 1.0 | 1 – 3 |
| Fósforo (P ₂ O ₅) | 0.04 – 3.3 | 0.93* | 1.5 – 5 |
| Potasio (K ₂ O) | 0.007– 0.4 | 0.30 | 0.2 – 0.8 |
| Sólidos volátiles | 42 – 50 | - | - |
| Unidades pH | 6.05 – 7.9 | - | - |

*Rangos típicos de biosólidos digeridos anaeróbicamente (NBP - Manual of good practice for biosolids)

** ADEME, Los biosólidos del tratamiento municipal y su uso en la agricultura.

Con respecto a las características microbiológicas, las concentraciones de coliformes fecales de los biosólidos de la mayoría de las PTAR de Colombia son las típicas de un biosólido de clase B; sin embargo, con respecto a los huevos de helminto, los biosólidos de las PTAR San Fernando y El Salitre tienen características de clase A tal como se observa en la tabla 4; no obstante, no se cuenta con datos de huevos de helminto de los biosólidos de las otras plantas del país.

Tabla 4. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos de Colombia (Daguer 2003).

| Indicador | Rango Colombia | NORMA EPA 40CFR-503 |
|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| Coliformes fecales (NMP/g) | $1.5 \times 10^5 - 5.1 \times 10^5$ | <2X10 ⁶ Clase B < 1000 Clase A |
| Huevos de helminto (Huevos/4 g) | <1* | >1 Clase B < 1 Clase A |

*Datos de las PTAR El Salitre y San Fernando

Los biosólidos de Clase A, pueden ser usados sin ninguna restricción (cultivos de consumo directo). Los biosólidos de clase B pueden ser usados en recuperación de suelos, plantaciones forestales, cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios; sin embargo, las concentraciones de indicadores de contaminación fecal limitan su aprovechamiento por un tiempo en cultivos agrícolas de consumo directo como las hortalizas (*Tchobanoglus*).

4.2 Efecto del biosólido sobre las propiedades del suelo

Como se dijo anteriormente el suelo es considerado como uno de los recursos naturales más importantes, de ahí la necesidad de mantener su productividad, para que a través de él y las prácticas agrícolas adecuadas se establezca un equilibrio entre la producción de alimentos y el acelerado incremento del índice demográfico (Environmental protection agency 2002).

4.2.1 Suelo

El suelo es un elemento de enlace entre los factores bióticos y abióticos y se le considera un hábitat para el desarrollo de las plantas. Gracias al soporte que constituye es necesario comprender las características físicas y químicas para propiciar la productividad y el equilibrio ambiental (sustentabilidad). En los siguientes ítems se plantea los posibles efectos de la aplicación de biosólido sobre la materia orgánica del suelo, la actividad respirométrica del suelo y los fenómenos de sorción que tienen lugar en el suelo.

4.2.1.1. Efecto sobre la Materia orgánica

- **Materia Orgánica**

La totalidad de la materia orgánica del suelo se puede reunir fundamentalmente en dos grupos. El primero está formado por restos orgánicos, los cuales son identificables como las partes total o parcialmente alteradas de la biomasa (plantas, animales y microorganismos). Estos representan los grupos de descomposición o los productos de la actividad vital (metabolismo y resíntesis) de la población viva. Lo característico de estos materiales es que son identificables por la química orgánica (proteínas y aminoácidos, hidratos de carbono simples y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros). Las sustancias de este grupo se consideran como fuentes de nutrientes para las plantas y los organismos del suelo. Igualmente, se les atribuyen actividades estimulantes e inhibitoras de crecimiento de las plantas, como antibióticos y vitaminas. La producción de CO₂ del suelo, respiración, está asociada a su utilización como sustrato por los microorganismos del suelo (Kokonova 1951, Steverson 1982).

Al segundo grupo componente de la materia orgánica del suelo se le llamó sustancias húmicas. Su formación se realiza por procesos de complicadas transformaciones de los restos vegetales y animales del primer grupo. El término es aplicado a compuestos que se forman en el suelo, por procesos no mediados por la vida (Kumada, 1987). En términos simples, las sustancias húmicas son una mezcla de compuestos que no son sintetizados directamente en los procesos bioquímicos que suceden en el suelo, aunque ellos tienen una acción inicial importante. Más específicamente, las sustancias húmicas son compuestos poliméricos formados a partir de los compuestos producidos por acción microbiana y que difieren de estos biopolímeros por su estructura molecular y su larga persistencia en el tiempo. La definición de sustancias húmicas no implica un grupo particular de compuestos orgánicos de relativa masa molecular o reactividad química. Es esencialmente un grupo muy disímil de compuestos orgánicos de naturaleza refractaria o recalcitrante (Stevenson, 1982).

En general, los principales procesos que se presentan con la materia orgánica en el suelo se pueden esquematizar como sigue:

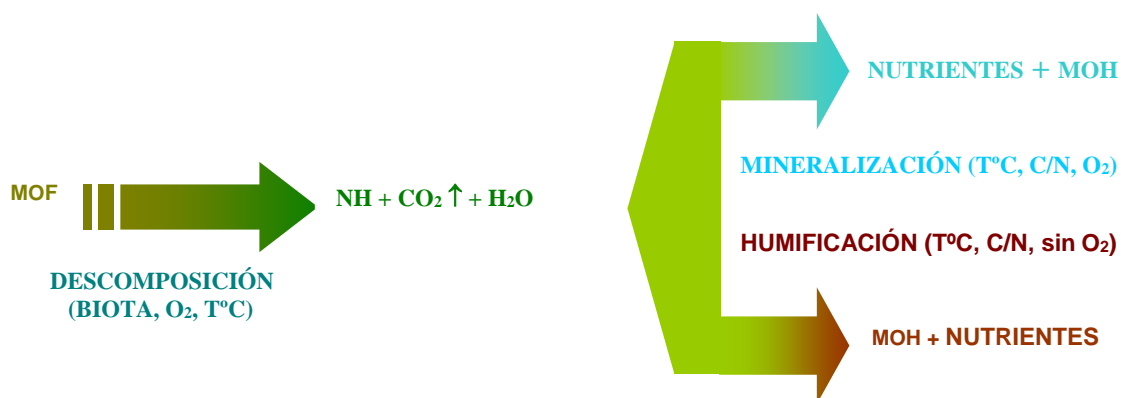


Figura 1. Procesos de la materia orgánica fresca (MOF) en el suelo dependiendo de su calidad (relación C/N, contenido de O₂, temperatura y biota (Jaramillo, 2002)

- **Efecto de los biosólidos sobre la materia orgánica**

Los biosólidos son considerados un aporte grande de materia orgánica fresca (MOF) en el suelo. Aplicar MOF al suelo puede ser benéfico o puede agravar o crear problemas, dependiendo de las características particulares de la MOF. En el caso de materia orgánica originada o proveniente de subproductos agrícolas, urbanos o industriales, su origen y composición determinan su posible utilidad y uso, pues una materia orgánica poco estabilizada y en grandes adiciones al suelo puede aumentar indiscriminadamente la actividad microbial del suelo.

4.2.1.2 Efecto sobre la actividad respirométrica microbial del suelo

- **Respiración del suelo**

La biota del suelo la compone el conjunto de la fauna y la flora que viven en él; la gran mayoría de los organismos del suelo vive en las capas superficiales del *litter* (residuos vegetales frescos), donde las condiciones de humedad, temperatura, ventilación y luminosidad, así como el espacio disponible, satisfacen sus necesidades.

Los microorganismos edáficos son muy importantes por cuanto: a) descomponen la materia orgánica (vegetal o animal) y otros residuos orgánicos, con liberación de energías; b) mejoran las propiedades físicas edáficas (mucílagos); c) solubilizan nutrientes a partir de formas insolubles (ya sean minerales primarios o complejos orgánicos); d) fijan Nitrógeno (N₂) atmosférico; e) mejoran la nutrición radicular mediante formación de micorrizas; f) poseen un acción controladora (antagónica) de organismos patógenos; y g) compiten con las plantas frente a bioelementos (Campbell 1998).

Los microorganismos respiran continuamente y la tasa de respiración es un índice confiable de la actividad respirométrica microbial. Los factores que afectan el crecimiento también influyen en la respiración en el mismo grado.

- **Efecto de los biosólidos sobre la respiración del suelo**

El gran número de organismos existentes en tan reducido espacio obliga a un equilibrio dinámico, por lo que cualquier acción por romperlo tiene una respuesta inmediata tendiente a retornar al equilibrio (poder de amortiguación); obviamente un impacto sobre el suelo demasiado fuerte puede tener como consecuencia el rompimiento irreversible del equilibrio y en ese caso se supera la "carga crítica", lo que supondría la degradación del suelo. Este rompimiento del equilibrio es posible detectarse con la aplicación de biosólidos, el efecto es efecto "Priming". Este consiste en que al incorporar al suelo MOF se puede estimular la descomposición del humus nativo en el mismo, como se ilustra en figura 2

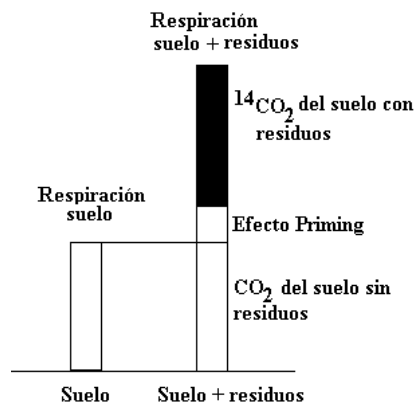


Figura 2. Influencia de residuos vegetales aplicados, marcados con ^{14}C , sobre la pérdida del carbono nativo del suelo como CO_2 (Stevenson, 1987).

La cantidad de carbono nativo del suelo perdido a través del "efecto Priming" se toma como la diferencia entre la cantidad de CO_2 del suelo producido en presencia y ausencia del sustrato material fresco. Este efecto se debe a que hay una mayor actividad, de una gran y activa población de microorganismos cuando la MOF se aplica como fuente de energía ya que producen enzimas capaces de atacar la materia orgánica nativa (Schinitzer 1991). Esta pérdida de materia orgánica, principalmente humus, es un hecho contrario a lo que se desea que es aumentar su contenido. Adicional a esta pérdida, las propiedades del suelo se ven afectadas, principalmente las físicas. Por ejemplo hay pérdida de estructura, disminución de la infiltración y erosión laminar, entre otros deterioros del suelo.

4.2.1.3 Efecto sobre los fenómenos de adsorción - Desorción de metales en el suelo

Fenómenos de sorción en el suelo

La estabilidad de los coloides del suelo, en los medios acuosos, se explica considerando fenómenos superficiales en la interfase sólido- agua. El contacto entre las fases sólidas y las acuosas genera interacciones entre las especies químicas disueltas y el sólido lo que provoca fenómenos de sorción, esto es muy relevante en los procesos edáficos puesto que en el suelo, hay una gran superficie de contacto entre la fase sólida y la acuosa (Usman., et al, 1998)

Evaluación de los fenómenos de sorción en el suelo

Conocer el efecto de los biosólidos sobre los fenómenos es importante ya que se puede conocer de una manera fácil la manera con que pueden ser o no retenidos metales pesados, así como también la facilidad con que pueden ser desorbidos, este conocimiento tiene un efecto inmediato sobre los problemas ambientales que puede generar los biosólidos ya que se puede saber si se contaminarán o no las aguas subterráneas e incluso el efecto fitotóxico sobre los cultivos

Para evaluar los fenómenos de sorción se debe tener en cuenta que debe existir un equilibrio entre fases y se determina conociendo la proporción de una especie química concreta llamada sorbato, asociada a la fase sólida llamado sorbente, fruto del contacto de dicha fase con una disolución acuosa de esta especie a una temperatura determinada. La relación entre las concentración de una especie química en la fase sólida y acuosa, respectivamente, se denomina isoterma de adsorción. La adsorción sobre la superficie sólida es un proceso muy común en el suelo y determina muchas de las propiedades fisicoquímicas del mismo.

Los dos modelos de isotermas de adsorción más utilizados en la extracción de un único componente son los correspondientes a las ecuaciones de Langmuir (1915) y de Freundlich (1939). Los dos modelos describen una amplia gama de equilibrios de adsorción y permiten una interpretación física sencilla de cómo se producen las interrelaciones entre una sustancia adsorbida y una fase que adsorbe (Usman., et al, 1998)

Isoterma de Langmuir. Este modelo se desarrolló originalmente para representar la adsorción gas-sólido con carbón activo. En este modelo la atracción entre los iones del metal y la superficie del sorbente se basa principalmente en fuerzas físicas y no tiene en cuenta las agrupaciones moleculares ni las variaciones de energía de la interacción con el material. La principal hipótesis del modelo es que la superficie de adsorción es uniforme (Lahav., et al, 1967)

La expresión matemática de la ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$q_e = q_{max} \cdot (C_e \cdot b) / (1 + b \cdot C_e) \quad (\text{ec 1})$$

Siendo q_{max} la capacidad máxima adsorbida de soluto por unidad de masa de adsorbente (mmol metal g⁻¹ biosorbente), q_e la cantidad de metal retenida por parte del biosorbente (mmol metal g⁻¹ biosorbente), C_e (mmol dm⁻³) la concentración de equilibrio del metal en disolución y b la constante de Langmuir relacionada con la energía de adsorción que refleja cuantitativamente la afinidad entre sorbente y sorbato. Cuanto más alto es el valor de b , más afinidad y más fortaleza de unión existe entre sorbente y sorbato.

El cálculo de q_e se realiza a partir de los datos experimentales de la siguiente forma:

$$q_e = V \cdot (C_i - C_e) / w \quad (\text{ec 2})$$

Siendo V el volumen de la disolución (dm³), C_i y C_e las concentraciones inicial y en el equilibrio respectivamente (mmol dm⁻³) y w el peso del sorbente (g). Para poder determinar los valores q_{max} y b para de cada pareja sorbato-sorbente se linealiza la Ecuación (ec 1):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} \cdot C_e \quad (\text{ec3})$$

Representando C_e/q_e frente a C_e se encuentra el valor de $1/b \cdot q_{max}$ como ordenada en el origen y de $1/q_{max}$ como valor de la pendiente de la recta.

C_e : concentración de equilibrio del soluto en el líquido.

q_e : capacidad de intercambio en el equilibrio.

b : máxima capacidad de adsorción. Constante relacionada con los lugares ocupados y libres en la superficie del sorbente.

$K=q_{max}$: constante de equilibrio de la reacción, esta constante está relacionada con la energía con la que es retenido el metal en el suelo.

Las isotermas de Langmuir han llegado a ser de uso común para describir las relaciones entre el sólido y la solución en el sistema suelo-solución. Su amplio uso se basa en dos coeficientes que genera la ecuación: uno que describe la máxima adsorción y otro que describe la energía de esta adsorción (Harter y Smith, 1981).

- **Efecto de los biosólidos sobre los fenómenos de sorción del suelo**

A pesar de las ventajas agronómicas que poseen los biosólidos éstos pueden generar un riesgo ambiental, debido a la concentración de metales que pueden conllevar al ser adicionados al suelo.

La adición de biosólido al suelo es también una fuente de materia orgánica la cual provee el suelo de sitios activos capaces de adsorber sobre su superficie metales pesados. Un elevado contenido de metales en el biosólido y la competencia por estos sitios con otros iones presentes en el biosólido puede ocasionar una rápida saturación de los sitios activos dejando libres muchos de estos metales en la solución del suelo donde pueden ser absorbidos por las plantas o lixiviados a través del perfil del suelo (Harter y Smith, 1981). En resumen un aumento en el contenido de metales pesados en el suelo puede traducirse en una disminución de la actividad biológica y en una degradación del complejo de cambio, tanto orgánico como mineral (Kabata-Pendías 1995), es decir los biosólidos generan un riesgo ambiental, este hecho implica entonces conocer el efecto directo sobre los cuerpos de agua y los cultivos.

- **Contaminación de aguas y plantas por biosólidos**

Los metales presentes en los biosólidos pueden pasar al suelo, dependerá de la capacidad que tenga el suelo de retenerlos para que estos no lleguen a los cuerpos de agua. Como consecuencia de la desorción, los metales son removidos de la superficie del suelo coloidal hacia los cuerpos de agua o hacia la solución del suelo. Muchos son los mecanismos involucrados y dependen de la naturaleza de las interacciones y los diferentes mecanismos de adsorción por los cuales se unieron al suelo. Estos mecanismos están condicionados por una serie de factores como son la textura, el contenido de materia orgánica, el pH, el contenido de carbonatos, etc (Kabata-Pendías 1995).

Si la aplicación de biosólido genera un deterioro de dichas factores, se facilitara el movimiento descendente de los metales pesados, aún en pequeñas cantidades y muy lentamente, hasta engrosar las concentraciones a valores tan elevados que genera un riesgo ambiental ó se facilitara la acumulación en los primeros centímetros del suelo, zona radicular, donde pueden ser desorbidos por los exudados radiculares y absorberse a través de la planta generando niveles fitotóxicos.

5. METODOLOGÍA

En la presente investigación se tomaron muestras de suelo, pastos y aguas de la finca La Pradera ubicada en el municipio de Entrerrios, departamento de Antioquia. Inicialmente se seleccionaron dos parcelas, una manejada bajo biosólido y otra bajo fertilizantes químicos, Las parcelas fueron divididas en cuatro lotes, en la dirección de la vertiente. En cada uno de los lotes se ubicaron un lisímetro, un piezómetro y se tuvo una parcela de escorrentía. En cada uno de los lotes se tomaron muestras de suelo, agua y pasto, para el respectivo análisis químico.

5.1 Ubicación Geográfica:

La presente investigación se desarrolló en la finca la Pradera, Corregimiento Pio XII, ubicada a 2745 de altitud, la cual lleva de varios años (3-5años) usando biosólidos en suelos sembrados con pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Rochts)

5.2 Selección de las Parcelas

En la primera visita a la finca se recorrieron los predios con el fin de seleccionar la parcela Experimental (con Biosólido) y la parcela Testigo (sin Biosólido), teniendo en cuenta que ambas parcelas tuvieran los mismos componentes fisiográficos en cuanto a pendiente y fuentes de agua. En la figura 3 se presentan las imágenes de las parcelas Experimental y Testigo escogidas.



Figura 3. Parcela experimental (izquierda) y Testigo (derecha)

Cada una de las parcelas se dividió en cuatro lotes teniendo en cuenta la morfología de la vertiente: una en la parte superior, pendiente de 5% aproximadamente, dos parcelas en la parte media de la vertiente con pendientes entre 15 y 25% y un lote en la baguada con pendiente entre 5 y 8 %. Al final de este lote se tiene una corriente de agua libre en superficie. Los lotes de la parcela Tratamiento se denomina L1B, L2B, L3B y L4B. Los lotes de la parcela Testigo se denominan L1T, L2T, L3T y L4T. La disposición de los lotes numerados del 1 al 4 se presenta en las figuras 4 y 5.

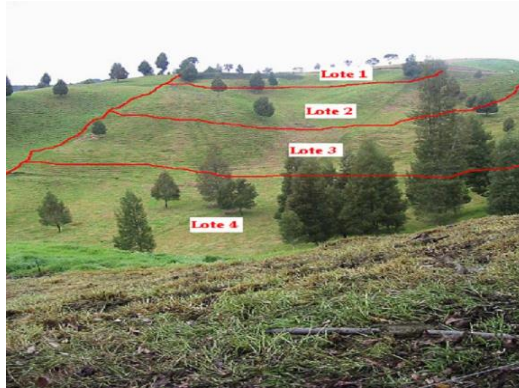


Figura 4. Parcela Experimental mostrando la división de los lotes



Figura 5. Parcela Testigo mostrando la división de los lotes

5.2.1 Tratamiento de las parcelas

Las parcelas seleccionadas para la investigación tienen un manejo diferente, a continuación se especifica el manejo que se le ha dado a cada parcela:

- Parcela Experimental: tiene un área de 1.4 ha, está cultivada con pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Rochts). Hace tres años se le aplica Biosólido, cada cuarenta y cinco días, después de cada pastoreo, como única fuente de fertilización. Al final de los cuarenta y cinco días, se somete el potrero a pastoreo de 3 a 5 días de acuerdo a la carga animal

Para determinar en forma exacta la cantidad de biosólido que se aplica a esta parcela se instalaron 6 textiles, cada una con un área de 0.52 m², previo a la aplicación (figura 6). Después de haber recibido la aplicación las mantas (figura 7) se empacaron en bolsas plásticas, se pesaron en húmedo y luego de secarlas al aire, para determinar el volumen y la masa de Biosólido aplicado expresado en kg m⁻² (tabla 5).



Figura 6. Mantas instaladas en parcela experimental antes de la aplicación del Biosólido



Figura 7. Aplicación de Biosólido con las mantas instaladas.

Tabla 5. Cálculo de la cantidad biosólidos aplicados a la parcela Experimental

| Manta # | Concentración Biosólidos (% p/v) | Cantidad aplicada | |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------|
| | | Volumen L/m ² | Materia seca Kg/ha |
| 1 | 8,14 | 2,8 | 2241 |
| 2 | 12,55 | 3,5 | 4405 |
| 3 | 9,28 | 4,0 | 3727 |
| 4 | 11,68 | 2,9 | 3419 |
| 5 | 8,89 | 2,4 | 2137 |
| 6 | 9,11 | 2,4 | 2145 |
| Promedio | 9,94 | 3.0 | 3012 |

- Parcela Testigo: tiene un área de 0.5 hectáreas igualmente cultivada con pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Rochts), cada 45 días es fertilizada con Urea y DAP como únicas fuentes enriquecedoras del suelo, la dosis aplicada es dos bultos de Urea más un bulto de DAP. Al final de los 45 días es sometida a pastoreo de 3 a 5 días dependiendo de la carga animal.

5.2.2 Instrumentación instalada en cada parcela

Una vez seleccionadas las parcelas y dividir las por lotes, se instalaron instrumentos con el propósito de recolectar muestras de agua superficiales y de infiltración a diferentes profundidades. La instrumentación utilizada se describe a continuación:

Lisímetros: estos instrumentos se instalaron con el fin de recolectar aguas de infiltración por debajo de la zona radicular. El lisímetro (Ls), a través de su abertura superior figura 8, recogió muestras representativas de agua de drenaje.

Los lisímetros utilizados en la parcela experimental se denominan Ls1B, Ls2B, Ls3B y Ls4B, los lisímetros utilizados en la parcela Testigo se denominan Ls1T, Ls2T, Ls3T y Ls4T, (Ls=lisímetro, #= ubicación del lote en la parcela, T y B = parcela testigo y experimental respectivamente)



Figura 8. Instalación de lisímetro debajo del horizonte A

- **Parcela de Escorrentía**

Estos instrumentos se usaron con el fin de recolectar el agua que en lugar de infiltrarse recorren la superficie del suelo ó agua de escorrentía, la instalación se llevó a cabo como se muestra en la figura 9. Las parcelas de escorrentía (pe) utilizadas en la parcela experimental se denominan Pe1B y Pe2B y Pe3B y las de la parcela Testigo se denominan Pe1T y Pe2T y Pe3T. (Pe= parcela de escorrentía, #= ubicación del lote en la parcela, T y B = parcela testigo y experimental respectivamente)



Figura 9. Instalación de parcela de Escorrentía

- **Piezómetro**

Los piezómetros (Pz) se utilizaron para recolectar aguas subterráneas a una mayor profundidad de las aguas recogidas en los lisímetros. Estos instrumentos se instalaron (Figura 10), a dos profundidades de acuerdo al grado de inclinación: a 1.0 m en la parte media de la vertiente y a 0.5 m en la parte baja, baguada. Los piezómetros utilizados en la parcela experimental se denominan Pz1B y Pz2B y los piezómetros de la parcela Testigo se denominan Pz1T y Pz2T. (Pz= piezómetro, #= ubicación del lote en la parcela, T y B = parcela testigo y experimental respectivamente)

Figura 10. Instalación de Piezómetros



5.2.3 Análisis Químicos

Con el objeto de determinar el contenido de metales pesados en el biosólido y su efecto sobre el suelo, aguas y pastos, se evaluó la concentración de cromo, cadmio, plomo y níquel presentes en aguas, suelos, pastos y biosólido, mediante espectrofotometría de absorción atómica en muestras recolectadas tanto en la parcela

experimental como en la parcela testigo. El efecto de dicha aplicación sobre los fenómenos de sorción y la materia orgánica nativa del suelo se evaluó mediante isotermas de adsorción y mediciones de respirometría. Además se evaluó el contenido nutricional.

Las siguientes fueron metodologías utilizada para cuantificar los nutrientes y metales pesados en cada matriz evaluada (biosólido, suelo, planta, aguas).

5.2.3.1 Metodología para determinaciones Analíticas en Biosólidos

Para evaluar el Biosólido producido por la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando del municipio Medellín, departamento de Antioquia, se determinó el contenido nutricional mediante las determinaciones de contenidos totales de nitrógeno, fósforo y potasio, además de la concentración de metales pesados cromo, cadmio, plomo y níquel.

La metodología utilizada para tal fin presenta el siguiente orden:

- **Recolección de la muestra:** se tomó una muestra representativa del lote de Biosólido fresco, que se aplicó a la parcela experimental al iniciar la investigación.
- **Secado:** la muestra de Biosólido fresca se secó a temperatura ambiente, bajo invernadero.
- **Molienda:** después de secada a temperatura ambiente, se llevo a estufa a 105° C durante 24h y se sometió a molienda en un molino Willey con el objeto de homogenizar la muestra.
- **Análisis del Contenido de N P K:**

Se pesó 1 g de muestra en un crisol de porcelana; la cual se calcinó en una mufla a 450 °C durante 14 - 16 horas; las cenizas se tratan en ácido clorhídrico en una relación suelo ácido 2:1, se filtro, llevándola a volumen determinado y en el filtrado se determino fósforo, potasio y nitrógeno de acuerdo a la metodología para muestras foliares del laboratorio de suelos de la universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, esta metodología se describe en el análisis de pastos.

- **Análisis de Metales pesados:** en mismo extracto obtenido mediante la digestión se determino: cromo, cadmio, níquel y plomo, por Espectrofotometría de absorción Atómica, las longitudes de onda para cada metal son Cr= 357,9nm; Cd= 228,8nm; Pb= 283,3nm y Ni= 232,0nm.

5.2.3.2 Metodología para Determinaciones Analíticas en Suelos

Se determinaron diferentes parámetros físicos y químicos: textura, pH, Materia orgánica, acidez intercambiable, CIC, Ca, Mg, Na y K intercambiables, contenidos de fósforo, azufre disponibles y contenido de micronutrientes disponibles. Además se

evaluó el contenido de metales pesados en suelos tanto de la parcela experimental como testigo, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- **Recolección de las muestras**

Se tomaron cuatro muestras compuestas formadas cada una por 10 submuestras en cada uno de los cuatro lotes. Se procuró recorrer todo el lote para la toma de las submuestras. El muestreo se realizó a dos profundidades: de 0-10 cm. y de 10-20 cm..

- **Análisis de propiedades Físicas y químicas del suelo**

Con el objeto de identificar los suelos a estudiar, se realizan análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Medellín. Los análisis comprendieron las siguientes determinaciones:

Textura: se determinó mediante el método de Bouyoucos que consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un hidrómetro. La profundidad del centro de flotación del Hidrómetro varía con la densidad de la suspensión y también con la textura. Después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras sedimentarán de tal manera que no tendrán influencia sobre el hidrómetro. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 micras y a las dos horas a partículas menores de 2 micras.

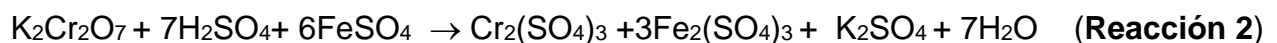
pH: se determinó mediante el método potenciométrico, en una suspensión suelo: agua, en relación 1:1 para lo cual se midió con el recipiente plástico de 25 ml una porción de suelo y una porción de agua destilada; se agitó, en forma esporádica, durante 30 minutos.

Después de este lapso de tiempo se midió el pH de la mezcla; utilizando un pH – metro METROHM E-744 con electrodo combinado de vidrio.

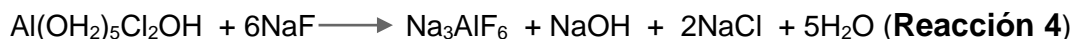
Materia orgánica: se realizó mediante el método de Walckley – Black, el cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante $K_2Cr_2O_7$ 1N y como medio ácido sulfúrico concentrado.



Como subproducto de la reacción queda materia orgánica que no se oxida y $K_2Cr_2O_7$ sin reaccionar entonces se valora volumétricamente el $K_2Cr_2O_7$ con una solución de sulfato ferroso amónico. La reacción es



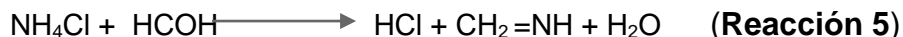
Acidez intercambiable: se determinó mediante el método de desplazamiento, que consiste en desplazar los iones H^+ y Al^{+3} del suelo con una solución neutra de KCl. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de $Al(OH_2)_5^{2+}$ y se valorará el Al^{+3} presente en forma hidratada de acuerdo a las siguientes reacciones:



El NaOH producido se tituló con HCl y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de $AlCl_3$, el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH es igual al número de miliequivalentes de Al^{+3} .

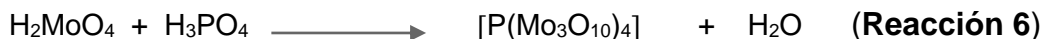
La acidez intercambiable menos acidez de aluminio es igual a la acidez del H^+ .

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH_4^+ ; el suelo seco, tamizado y muy fino, se saturó con NH_4^+ . Posteriormente, se desplazaron los iones NH_4^+ adsorbidos con NaCl, al 10% obteniéndose NH_4Cl en solución, que se trató con formaldehído neutro. El HCl obtenido se tituló con NaOH 0,1 N. La reacción muestra lo que ocurre:



Bases Intercambiables: Corresponden al Calcio, Magnesio y Potasio. Se determinaron en el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio ($AcONH_4$) de la determinación de CIC y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el Equipo de absorción atómica Perkin Elmer 2380 del laboratorio de suelos.

Fósforo Disponible: El método utilizado para esta determinación en suelos ácidos fue el Bray II, en el cual el ión fluoruro precipita el calcio soluble, extrayendo así las formas de P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, el cual consistió en formar un complejo del fósforo con ácido molíbdico que absorbe a 660nm. El método cloro-molíbdico utiliza una solución de $HCl-(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, que al reaccionar produce H_2MoO_4 . Posteriormente, este ácido molíbdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la siguiente reacción:



Este hetero compuesto incoloro por reducción con ácido ascórbico forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 nm. El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro UV-VIS PERKIN ELMER LAMBDA 1.

Azufre Disponible:

Método Turbidimétrico: El Azufre se determinó por turbidimetría con Cloruro de Bario (BaCl_2) al 10% y Glicerina, directamente del filtrado obtenido de la digestión húmeda.

Se tomó 1 ml del filtrado + 4 ml de agua destilada, + 2 ml de solución de (BaCl_2 /Glicerina), se agita y se lee en el colorímetro a una longitud de onda de 420 nm. Para los patrones se procede de la misma manera que con las muestras. El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro VIS Spectronic 20 Bausch & Lomb.

Micronutrientes (Cu, Mn, Fe y Zn):

Se utiliza una solución extractora de DTPA fuertemente tamponada con trietanolamina. Su determinación se realiza por Espectrofotometría de Absorción Atómica en el equipo Perkin Elmer 2380, cada uno a su respectiva longitud de onda, Cu= 324,8nm; Mn= 279,5nm; Fe= 248,3nm; Zn= 213,9 nm

Boro Disponible: la extracción del boro se hace en caliente. Se cuantifico midiendo el desarrollo de color del complejo colorimétrico con azometina-H, a 428 nm. El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro UV-VIS PERKIN ELMER LAMBDA 1.

• **Análisis de metales Pesados**

Se determinaron las concentraciones de cromo, cadmio, níquel y plomo en suelo tanto de la parcela testigo como de la parcela experimental. Después de realizar la extracción de metales pesados, mediante digestión ácida de acuerdo a la metodología del laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se pesaron 1g de suelo se añaden 5 ml de ácido nítrico concentrado, se cubre cada vaso con un vidrio de reloj y se calentaron en placa calefactora a 140°C en el interior de una vitrina extractora de gases, se retiró el vidrio de reloj y se lavó con 2 ó 3 ml de ácido nítrico diluido al 10%, se filtró y se aforó a 10 ml con ácido nítrico diluido en esta solución se cuantifico por absorción atómica la concentración de metales en un equipo Perkin Elmer 2380 a longitudes de onda para Cr= 357,9nm; Cd= 228,8nm; Pb= 283,3nm y Ni= 232,0nm.

5.2.3.3 Metodología para Determinaciones Analíticas en Pastos:

En pasto se evaluó, tanto en la parcela experimental como en la testigo, los contenidos totales de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre, Hierro, Manganeseo, Cobre Zinc y Boro. Además del contenido de cromo, cadmio, níquel y plomo. El procedimiento utilizado se describe a continuación:

• **Recolección de la muestra**

Se tomaron cuatro 4 muestras compuestas de pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) conformadas por 5 submuestras tomadas al azar, una en cada uno de los lotes

- **Análisis de características químicas**

Después de recolectadas las muestras en campo se llevaron al laboratorio y fueron secadas y molidas.

Secado: las muestras se secan en bolsas de papel en una estufa con sistema de convección mecánica a 60 °C durante 48 horas.

Molienda: Las muestras previamente secas se muelen en un molino Willey y se tamizan por malla de acero inoxidable de 2 mm.

Terminada la molienda se pesó 1 g de muestra en un crisol de porcelana; la cual se calcinó en una mufla a 450 °C durante 14 - 16 horas; las cenizas se tratan, con ácido clorhídrico en una relación suelo: ácido 2:1, filtrando y llevando a un volumen determinado. En el filtrado se realizan las determinaciones especificadas a continuación:

Determinación de Ca, Mg y K: Se tomó 1 ml del extracto procedente de la digestión de cenizas, se adicionó 2 ml de solución de óxido de lantano al 5 % P/V y se diluyó a 50 ml estos elementos se cuantificaron en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer 2380.

Determinación de Fe, Mn, Cu y Zn: Estos elementos se cuantificaron en el extracto de la digestión ácida de las cenizas por espectrofotometría de absorción atómica en el equipo Perkin Elmer 2380 las longitudes de cada metal son: Cu= 324,8nm; Mn= 279,5nm; Fe= 248,3nm; Zn= 213,9 nm.

Determinación de Fósforo: el proceso de cuantificación se realizó en el extracto ácido por colorimetría, siguiendo el mismo método colorimétrico a 660 nm descrito en la cuantificación del fósforo en las muestras de suelo, el equipo utilizado en esta determinación fue un Espectrofotómetro UV-VIS PERKIN ELMER LAMBDA 1.

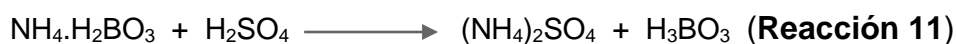
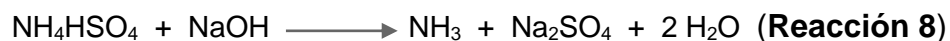
Determinación de Boro: del extracto ácido de las cenizas, se tomó una alícuota de 2mL y se determinó boro utilizando el mismo método colorimétrico utilizado en las muestras de suelo, el equipo utilizado en esta determinación fue un Espectrofotómetro UV-VIS PERKIN ELMER LAMBDA 1.

Determinación de Nitrógeno por el Método de Kjeldahl: este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales, se determinó en las muestras de pasto y consta de las siguientes etapas:

- a. Oxidación de la muestra El equipo utilizado en la digestión fue el BÜCHI B-430



b. Descomposición del sulfato ácido de amonio El equipo empleado para esta titulación fue el titulador universal METROHM E-72



Determinación de Azufre: se determino en el extracto procedente de la digestión por método turbidimétrico, de la misma manera que para las muestras de suelo.

- **Análisis de Metales Pesados**

En el extracto obtenido de la digestión de cenizas, se determinó directamente el contenido de cromo, cadmio, níquel y plomo por espectrofotometría de absorción atómica, en el equipo de absorción atómica Perkin Elmer 2380 a su respectiva longitud de onda

5.2.3.4 Metodología para Determinaciones Analíticas en Aguas.

Las muestras de agua fueron recogidas por succión en cada uno de los instrumentos instalados para recolección de muestras de agua de escorrentía y de infiltración a diferentes profundidades.

Después de la recolección por succión, las muestras se almacenaron inmediatamente en nevera se llevaron al laboratorio se filtraron y se determinó por absorción atómica los metales cromo, cadmio, níquel y plomo directamente en él filtrado, se uso un equipo de absorción atómica Perkin Elmer 2380.

5.2.3.5 Metodologías para determinar la adsorción-desorción y la respirometría del suelo

Los ítems 5.2.3.5.1 y 5.2.3.5.2 son metodologías que se utilizaron con el objeto de medir el efecto de la aplicación de biosólidos sobre dos grandes fenómenos del suelo que son: los fenómenos de sorción y la respiración del suelo, fenómenos que determinan si el biosólido está causando daños ambientales. La evaluación se realizó mediante isotermas de adsorción- desorción y con la medida de la respiración del suelo.

5.2.3.5.1 Metodología para Isotermas de Adsorción- Desorción

Con el propósito de evaluar el efecto de la aplicación de biosólido sobre procesos de sorción de los suelos se realizaron Isotermas tanto de adsorción como de desorción para cada metal (**Pb, Cr, Cd, Ni,**) usando el modelo de Langmuir, la metodología usada para este propósito se describe a continuación:

- **Recolección de suelo**

Se recolectaron cuatro muestras compuestas de suelo conformadas por 10 submuestras, correspondientes a cada uno de los cuatro lotes. Se tomaron a una profundidad de 0-10 cm. Las muestras se llevaron al laboratorio donde fueron secadas al aire, homogenizadas y tamizadas por malla No.10.

- a. Isotermas Adsorción**

Para realizar las isotermas inicialmente se realizó el proceso de **Incubación**, para lo cual, 5 g de muestra de suelo se incubaron con varias dosis de biosólido correspondientes a 0, 3, 6, 9 ton biosólido/Ha de suelo, durante un período de 45 días a temperatura ambiente. Cada una de estas dosis se preparó 4 veces y a cada una de ellas se incubó con cuatro concentraciones crecientes (20, 40, 60, 80, ppm) de metal pesado finalmente se agitaron durante 2 horas a temperatura ambiente. Este procedimiento se realizó para cada dosis de biosólido y para cada metal pesado (cromo, cadmio, níquel plomo) Para ello se utilizó un diseño de bloques al azar con arreglo normal de las dosis y tres repeticiones por dosis. Finalmente se midió la desorción de los metales cromo, cadmio, níquel y plomo, usando como extractante una solución de ácido cítrico de concentración 0,05M.

- **Valoración del metal retenido**

Se prepararon cuatro incubaciones de suelo con biosólido por cada dosis (0, 3, 6, 9 ton biosólido/Ha de suelo), a estas cuatro incubaciones se adicionaron concentraciones de 20, 40, 60 y 80 ppm de metal pesado respectivamente, se agitaron durante dos horas en un agitador orbital TA-09 especial INDULAB, a 140 rpm y a temperatura ambiente al

cabo de las cuales se filtro la suspensión. En el filtrado se determinó la concentración de metal en la solución de equilibrio y por diferencia entre el metal suministrado y el que permanece en la solución de equilibrio se determina el metal adsorbido. Este mismo procedimiento se realizo para las siguientes dosis de biosolido y para cada metal. El procedimiento se relaciona en la figura 11.

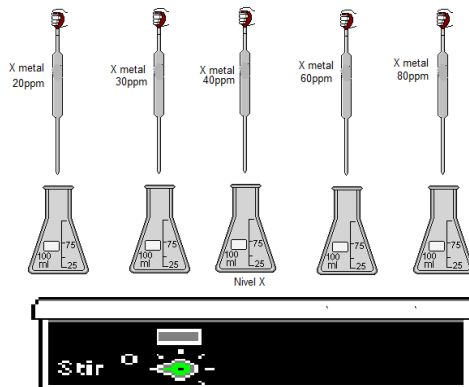


Figura 11. Diagrama de la preparación de las suspensiones de suelo-metal.

Con los datos obtenidos a partir de esta metodología se graficaron las isotermas para cada tratamiento. Una descripción general de este procedimiento se relaciona en la tabla 7 para la Isoterma del Cromo. Este mismo procedimiento se aplico para cada tratamiento y para cada metal.

Las columnas 1 y 3 representan las concentraciones y el volumen de solución de cromo adicionado al suelo, la columna 2 son los gramos de suelo utilizados y ya incubados con la primera dosis de biosolido (0Ton biosolido/Ha) y la columna 4 representa los miligramos contenidos en los mililitros de solución de cromo adicionados inicialmente.

Después de realizada la agitación se determino la concentración de cromo en suspensión es decir el cromo que no fue adsorbido por el suelo, de aquí se obtuvo las columnas 5, 6 y 7 que son la Absorbancia la concentración y los miligramos de cromo que quedo en suspensión respectivamente.

Por último la columna 8 es la que permite valorar el metal retenido en el suelo pues se obtiene de la diferencia entre el cantidad de metal suministrado (columna 4) y el contenido del metal que permanece en la solución una vez una vez alcanzado el equilibrio (columna 7) y la columna 9 representa los miligramos de metal adsorbido por gramo de suelo.

La columna10 es un parámetro que se requiere para el modelo de Langmuir y se obtiene de dividir el cromo que queda en suspensión después de agitación (columna 6) entre los miligramos de metal adsorbido/gramo de suelo. Este valor se grafica en función de C (columna 6) y se obtiene la isoterma de Langmuir (figura 12), la pendiente

de este modelo es $(1/b)$ de donde se obtiene b , la máxima capacidad de adsorción del suelo, y del intercepto $(1/Kb)$ se obtiene K que representa la energía de adsorción entre el metal (sorbato) y el suelo (sustrato).

Tabla 7. Isoterma de adsorción de cromo

| Suelo + 0Ton bios /Ha | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------------------------------|--|--|--|---------------------------------|--------------------|-------------------------|---------|
| Suelo utilizado | Volumen De solución de cromo adicionado | Concentración Cromo adicionado | Cromo contenido en el volumen adicionado | Absorbancia del Cromo en suspensión luego de agitación | Concentración de Cromo en suspensión (C) | Cantidad de Cromo en suspensión | cantidad Cromo ads | mg Cr ads/g suelo (x/m) | C/(x/m) |
| (g) | (mL) | (ppm) | mg | | (ppm) | mg | mg | | |
| 5,029 | 20,0 | 20 | 0,40 | 0,020 | 1,150 | 0,023 | 0,377 | 0,075 | 15,333 |
| 5,100 | 20,0 | 30 | 0,60 | 0,040 | 2,004 | 0,040 | 0,560 | 0,110 | 18,255 |
| 4,408 | 20,0 | 40 | 0,80 | 0,083 | 3,855 | 0,077 | 0,723 | 0,164 | 23,507 |
| 5,040 | 20,0 | 60 | 1,20 | 0,147 | 6,573 | 0,131 | 1,069 | 0,212 | 31,002 |
| 5,540 | 20,0 | 80 | 1,60 | 0,221 | 9,736 | 0,195 | 1,405 | 0,254 | 38,381 |

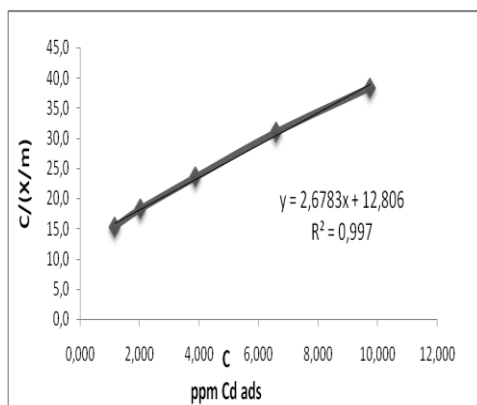


Figura 12. Isoterma de Langmuir de cromo para suelo sin aplicación de biosólido.

- **Metodología para determinar el efecto de la aplicación de biosólido sobre la adsorción de metales pesados.**

Con el mismo procedimiento explicado en el ítem anterior se determinó la energía de adsorción (K) y la máxima capacidad de adsorción del suelo (b), para cada una de las incubaciones, estos resultados se analizaron correlacionándolos en función de la dosis de biosólido aplicada y se conoció el efecto causado.

b. Isotermas de Desorción

Después de realizar las isotermas de adsorción, se determinó el fenómeno de desorción de metales pesados en el suelo para determinar si los exudados de la planta son o no capaces de desorber los metales ya adsorbidos por el suelo.

Terminado el proceso de adsorción, a la misma suspensión utilizada para medir el proceso de adsorción, se adicionan 20mL de ácido cítrico 0.05M, se agitó mecánicamente por dos horas y se determinó en esta suspensión mediante espectrofotometría de absorción atómica la concentración de metal en la solución. El procedimiento realizado para obtener tanto **b** como **K** fue el mismo que se usó para encontrar las isothermas de adsorción.

5.2.3.5.2 Metodología para análisis de actividad respirométrica del suelo.

Con el objeto de valorar el efecto de la aplicación de dosis progresivas de Biosólido sobre la materia orgánica nativa del suelo se determinó el CO₂ producido en función de dosis progresivas de biosólido incubado.

El primer paso fue determinar la cinética de reacción de la cual se obtuvo el orden y la velocidad de reacción (K). El equipo experimental fue construido en el Laboratorio de Suelos de La universidad Nacional de Colombia sede Medellín, donde se habilitó un espacio para su instalación

- **Recolección de suelo**

Se utilizó el mismo suelo recolectado para los análisis de fenómenos de sorción, de igual manera las muestras se llevaron al laboratorio donde fueron secadas al aire, homogenizadas y tamizadas por malla No.10, luego fueron incubadas con varias dosis de biosólido 0,3, 5, 7,10 y 12 Ton/Ha suelo.

- **Incubación**

Los parámetros cinéticos se midieron en muestras de suelo que previamente se habían incubado. Esta incubación se hizo de la forma siguiente: a porciones de 100g. de suelo se le adicionaron las cantidades correspondientes de biosólido para obtener en ellas dosis de 0, 0,3,5,7,10 y 12 Ton biosólido/Ha de suelo. La incubación se realizó siguiendo un diseño de bloques al azar con arreglo normal de las dosis y tres repeticiones esta incubación se hizo a una temperatura de 25°C, durante cinco días. (Ver Figura 13)

- **Valoración del CO₂ liberado:** El CO₂ liberado durante la respiración aeróbica en suelos se recogió en una solución alcalina de concentración 0.1M. La reacción en la cual el CO₂ es recibido en medio álcali es:



La cantidad de CO₂ recogido es equivalente a la cantidad de NaOH consumido. Para determinar esto, se tituló el remanente NaOH con HCl estándar. Las reacciones son:



La cantidad de NaOH inicialmente presente, menos la cantidad remanente al final del período de incubación, se utilizó para computar la cantidad de CO₂ involucrado por el suelo, que entra en la solución y reacciona con el NaOH. El proceso se representa como sigue en la figura 13.

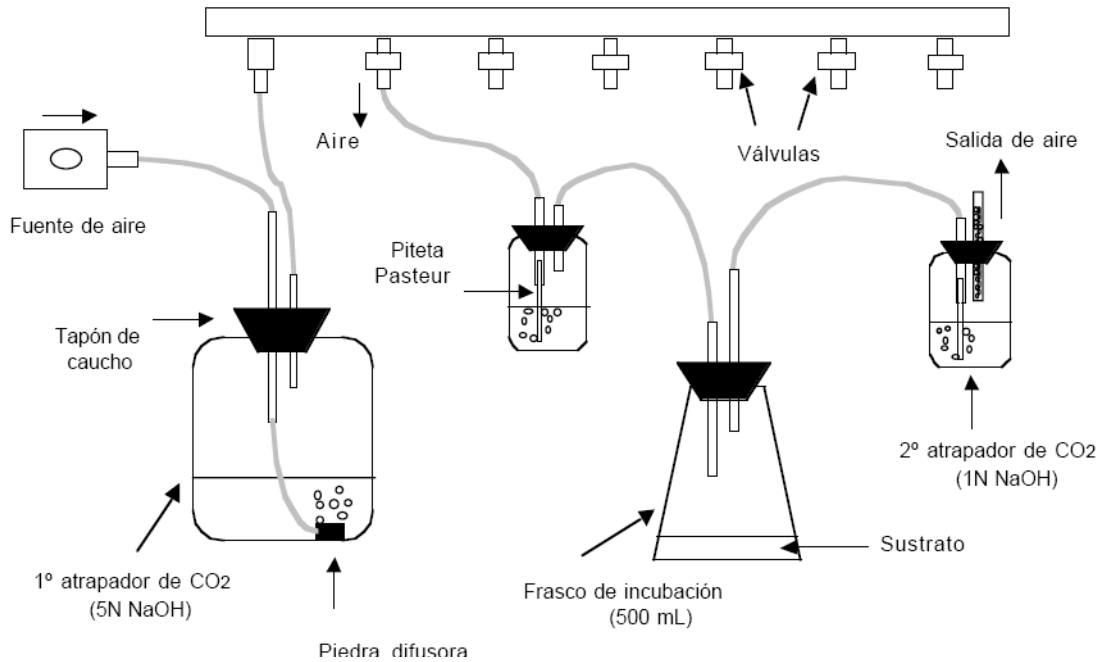


Figura 13. Análisis de Respirometría.

- La velocidad y el orden de reacción se obtuvo se la siguiente manera:

En la tabla 8 ilustra los resultados del suelo sin aplicación de biosólido, La columna 1 y 2 representan respectivamente los gramos de sustrato y los mililitros de agua usados para humedecer el suelo a capacidad de campo, la columna 3 son los tiempos a los que se midió el CO₂ liberado y las columnas siguientes son los valores obtenidos después de titular la solución alcalina en que se recogió el CO₂ liberado, por último la columnas 8, 9 y 10 se grafican en función del tiempo así:

- C vs tiempo → orden cero
- log C vs tiempo → primer orden
- 1/C vs tiempo → segundo orden

La grafica que más se ajuste al modelo lineal (mayor coeficiente de correlación), es el modelo que representa el orden de reacción.

Tabla 8. CO₂ producido de la reacción del suelo sin aplicación de biosólido.

| Gramos de suelo | mL agua | Tiempo (h) | mL Acido | meq Base f | meq Base i | Δ meq base (f-i) = meq CO ₂ | (C) mg de CO ₂ | Log (C) | 1/(C) |
|-----------------|---------|------------|----------|------------|------------|---|---------------------------|---------|-------|
| 100,010 | 40 | 1 | 4,78 | 0,478 | 0,5 | 0,022 | 0,484 | -0,315 | 2,066 |
| 100,009 | 40 | 2 | 4,51 | 0,451 | 0,5 | 0,049 | 1,078 | 0,033 | 0,928 |
| 100,000 | 40 | 3 | 4,46 | 0,446 | 0,5 | 0,054 | 1,188 | 0,075 | 0,842 |
| 100,001 | 40 | 4 | 4,21 | 0,421 | 0,5 | 0,079 | 1,738 | 0,240 | 0,575 |
| 100,001 | 40 | 5 | 4,18 | 0,418 | 0,5 | 0,082 | 1,804 | 0,256 | 0,554 |

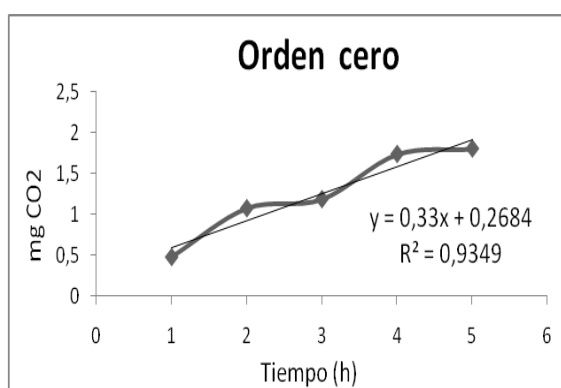


Figura 14. Modelos de primero, segundo y tercer orden para el suelo sin aplicación de biosólido.

- **Metodología para determinar el efecto de la aplicación de biosólido sobre la materia orgánica nativa del suelo.**

El intercepto en X=0 para el orden de reacción seleccionado representa los miligramos de CO₂ producidos a tiempo igual cero. Los valores de intercepto de cada uno de las incubaciones se relacionan con las toneladas de biosólido aplicado y se observó el efecto que causa la aplicación de biosólido sobre la materia orgánica nativa del suelo.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La información obtenida en esta investigación se presentará considerándose primero el contenido de metales pesados en el biosólido y segundo el efecto que tiene la fertilización con biosólido sobre los factores: riqueza agronómica o evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo, concentración de metales pesados en suelo, pastos y aguas, luego se discutirá el efecto de la aplicación sobre la capacidad de retención del suelo y la materia orgánica nativa.

6.1 Análisis de Metales Pesados en Biosólido

La tabla 9 indica que el Biosólido contiene una concentración considerable de metales pesados, cabe destacar que el cromo, es el metal que se encuentra en mayor concentración en el Biosólido. Sin embargo los resultados encontrados muestran valores inferiores a los encontrados en el 2003 (García, 2003) por Laboratorio Control Calidad Aguas de las Empresas Publicas de Medellín E.S.P. y también son inferiores a los requeridos por la norma **EPA 40CFR- 503**, indicando que una primera aplicación no produciría efectos tóxicos al suelo.

Tabla 9. Concentración de metales pesados en Biosólido de la planta San Fernando de Medellín.

| Contaminante mg/kg | PTAR San Fernando (Medellín) Datos de 2003 (Gestión Biosólidos EPM) | PTAR San Fernando (Medellín), Datos de 2009 | NORMA EPA 40CFR- 503 PC –EQ QUALITY |
|-----------------------|--|--|---|
| Cadmio | 1.8 | ND | 39 |
| Cromo | 2693 | 317,6 | - |
| Níquel | 137 | 70,5 | 420 |
| Plomo | 75.3 | 21,4 | 300 |

6.2. Análisis de Suelos: efecto del biosólido sobre Propiedades físicas. Químicas y sobre el contenido de metales pesados de los suelos.

- Análisis físicos y químicos. Los resultados se relacionan en la tabla 10

Tabla 10. Parámetros Físicoquímico de Suelo testigo y experimental

| Lotes Testigo | TEXTURA | | | | pH | M.O. | Al | Ca | Mg | K | CIC | P | S | Fe | Mn | Cu | Zn | B |
|--------------------|---------|----|-----|---------|-----|------|-----|------|-----|------|------|----|----|-----|----|----|----|------|
| | A% | L% | Ar% | Clase | | | | | | | | | | | | | | |
| L1T, 0-10 | 64 | 20 | 16 | FA | 5,6 | 18,3 | --- | 8,6 | 2,4 | 0,56 | 12,6 | 15 | 12 | 241 | 15 | 3 | 11 | 0,77 |
| L2T, 0-10 | 70 | 18 | 12 | FA | 4,9 | 18,6 | 1,8 | 4,7 | 1,1 | 0,76 | 8,4 | 16 | 13 | 251 | 17 | 4 | 16 | 0,42 |
| L3T, 0-10 | 72 | 22 | 6 | FA | 5,3 | 17,6 | 2,1 | 3,5 | 0,7 | 0,61 | 6,9 | 17 | 8 | 197 | 7 | 4 | 13 | 0,44 |
| L4T, 0-10 | 64 | 20 | 16 | FA | 5,1 | 17,7 | 1,2 | 5,6 | 1,8 | 0,76 | 9,4 | 15 | 9 | 233 | 14 | 2 | 5 | 0,31 |
| L1T, 10-20 | 66 | 18 | 16 | FA | 5,2 | 18,4 | 1,7 | 1,6 | 0,3 | 0,42 | 6,0 | 16 | 9 | 216 | 7 | 1 | 1 | 0,17 |
| L2T, 10-20 | 66 | 20 | 14 | FA | 4,8 | 18,2 | 2,1 | 4,6 | 0,4 | 0,34 | 7,4 | 17 | 16 | 225 | 5 | 2 | 8 | 0,37 |
| L3T, 10-20 | 74 | 18 | 8 | FA | 4,8 | 17,5 | 3,1 | 0,7 | 0,4 | 0,29 | 7,5 | 17 | 7 | 180 | 4 | 1 | 3 | 0,10 |
| L4T, 10-20 | 66 | 16 | 18 | FA | 4,8 | 17,3 | 3,1 | 1,8 | 0,3 | 0,21 | 5,4 | 17 | 12 | 253 | 4 | 1 | 1 | 0,15 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lotes Experimental | TEXTURA | | | | pH | M.O. | Al | Ca | Mg | K | CIC | P | S | Fe | Mn | Cu | Zn | B |
| | A% | L% | Ar% | Clase | | | | | | | | | | | | | | |
| L1B, 0-10 | 70 | 16 | 14 | FA | 5,7 | 22,4 | --- | 11,5 | 2,7 | 0,58 | 14,8 | 42 | 29 | 230 | 9 | 16 | 40 | 0,92 |
| L2B, 0-10 | 58 | 22 | 20 | FArA-FA | 5,5 | 22,3 | --- | 9,3 | 1,9 | 0,57 | 11,8 | 40 | 40 | 224 | 7 | 10 | 53 | 0,84 |
| L3B, 0-10 | 60 | 24 | 16 | FA | 5,6 | 23,1 | --- | 14,7 | 2,7 | 0,55 | 17,9 | 41 | 52 | 219 | 12 | 16 | 65 | 0,97 |
| L4B, 0-10 | 62 | 28 | 10 | FA | 5,7 | 25,4 | --- | 13,2 | 2,4 | 0,47 | 16,1 | 40 | 36 | 227 | 14 | 13 | 62 | 0,87 |
| L1B, 10-20 | 72 | 18 | 10 | FA | 5,5 | 25,3 | --- | 5,1 | 1,4 | 0,6 | 7,1 | 41 | 24 | 236 | 6 | 13 | 17 | 0,52 |
| L2B, 10-20 | 68 | 22 | 10 | FA | 5,5 | 25,2 | --- | 3,4 | 1,7 | 0,19 | 6,3 | 41 | 28 | 270 | 4 | 12 | 16 | 0,58 |
| L3B, 10-20 | 60 | 26 | 14 | FA | 5,5 | 25,4 | --- | 8,1 | 1,5 | 0,45 | 10 | 40 | 30 | 301 | 10 | 15 | 34 | 0,76 |
| L4B, 10-20 | 54 | 30 | 16 | FA | 5,5 | 22,6 | --- | 6 | 1,1 | 0,37 | 7,5 | 42 | 26 | 274 | 8 | 14 | 26 | 0,66 |

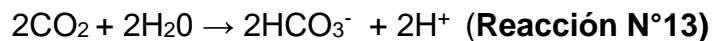
--- no se determina Al para suelos con pH ≥ 5.5

Los resultados para su interpretación se comparan con Parámetros para niveles de fertilidad (SCCS. 2000) descritos en las tablas del anexo 1 De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que el *suelo testigo*, sembrado con pasto Kikuyo tiene una textura Franco-arenosa, en general con un adecuado nivel de arcillas (12 – 16%), solamente tienen bajo nivel los lote L3T, 0-10 y L3T, 10-20. Todos sus lotes presentan alto contenido de materia orgánica (13-17 %) El 50 % de los lotes presentan una acidez muy fuerte, el 37.5% una acidez fuerte y el 12.5 una acidez media, lo cual influye directamente en la disponibilidad de varios nutrientes para el cultivo; en este rango de pH (4,8 – 5.6) se favorece el fenómeno de adsorción de nutrientes como el fósforo, el boro, el azufre y molibdeno en la fase coloidal del suelo, debido al predominio de cargas positivas que favorecen un intercambio aniónico. El grado de acidez que presenta este suelo se puede atribuir probablemente al alto contenido de MO, la cual por falta de un proceso adecuado de transformación genera alta carga de iones H⁺ al medio, a este fenómeno se le suma la contribución de acidez por el aluminio presente a estos valores de pH, que como se observa en la tabla son altos, produciendo además toxicidad no solamente al suelo sino a sus microorganismos y al cultivo de pasto puesto que inhibe procesos de división celular de las raíces.

El alto contenido de materia orgánica, influye sobre la capacidad de intercambio Catiónico, los valores de la CIC superiores a 4 meq/100g favorece el suelo protegiéndolo de pérdida de bases como Ca, Mg o K por lavado en dicho material

parental. El calcio se encuentra en valores altos para la mayoría de los lotes, aún cuando la acidez es muy fuerte, indicando un encalamiento que no fue suficiente para subir el valor de pH debido al efecto tampón producido por el alto contenido de MO, pero sí para subir el valor de este nutriente. Pero hay deficiencia de Mg, en el 75% de los lotes, esta base es tan necesaria para la planta siendo absorbida con rapidez, provocando el descenso de este nutriente en el suelo atribuible a la continua extracción por parte de los cultivos sin una adecuada reposición. El nivel de K es alto, proveniente principalmente de las arcillas presentes en este suelo. El P se encuentra en un nivel medio, a pesar de la fuerte acidez y se puede atribuir a la transformación del posible ácido fítico presente en apreciables cantidades en la materia orgánica del suelo.

Con respecto a los lotes del Suelo experimental al cual se aplica 3,0 Ton de Biosólido/Ha, no se observa cambios en su textura. Se producen efectos significativos a nivel de MO, incrementándose su contenido a niveles demasiado altos, lo cual puede alterar las condiciones del suelo. También se incrementa significativamente el valor de pH reduciendo la fuerte acidez llevándolo hasta a una acidez media, lo cual redundaría en un incremento significativo en los contenidos de bases como Ca y Mg, de nutrientes como el P, S, B, y una disminución significativa del contenido de Al intercambiable. La variación del pH e incremento en bases de cambio puede atribuirse al desprendimiento de CO₂, que posteriormente se convierte en bicarbonato solubilizando así más bases de cambio como se deduce del análisis, cuyo proceso se muestra en las reacciones 13 y 14.



El incremento en los nutrientes aniónicos obviamente se atribuye al incremento en la capacidad de intercambio catiónico como se detecta en este análisis por el incremento en el valor del pH y consecuente disminución del intercambio aniónico. Se observa además un incremento en estos lotes del contenido de micronutrientes: Fe, Mn, Cu y Zn presentes en el Biosólido

De las anteriores consideraciones se puede deducir que la aplicación superficial de biosólidos produce efectos favorables, similares a los registrados por Cavalieri et al. 2004.

- Análisis de metales pesados

En el anexo 2, tabla 6 se presenta los resultados de concentraciones de metales pesados (Cr, Cd, Pb, Ni) a profundidades de 0-10cm y 0-20cm, la figura 15 y 16 ilustran estos resultados gráficamente en la parcela testigo y experimental respectivamente.

Estas figuras demuestran que tanto en la parcela experimental como en la testigo, la concentración del Cromo, Cadmio, Plomo y Níquel tiende a permanecer en los primeros 10cm una mayor cantidad y entre 10 y 20cm esta cantidad es menor. Como el biosólido se aplica superficialmente y no se incorpora se puede decir que los metales pesados se mueven hasta esta profundidad.

Sidle et al. (1976) encontró que más del 93% de todos los metales pesados aplicados durante un período de 2 años se han acumulado en la superficie del suelo, Anderson y Nilson (1972) puso de manifiesto que prácticamente todos Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Cd, Hg, As y Se quedaron en la parte superior de 0-10 cm del suelo, 12 años después de la adición de 84 t ha⁻¹ de lodo.

La acumulación de Cd, Cr, Ni y Pb en la capa superior del suelo se puede atribuir a la alta afinidad de los metales a la materia orgánica y a la fuerte adsorción por coloides orgánicos y minerales, tales como arcilla, hidróxidos de hierro y óxidos de manganeso.

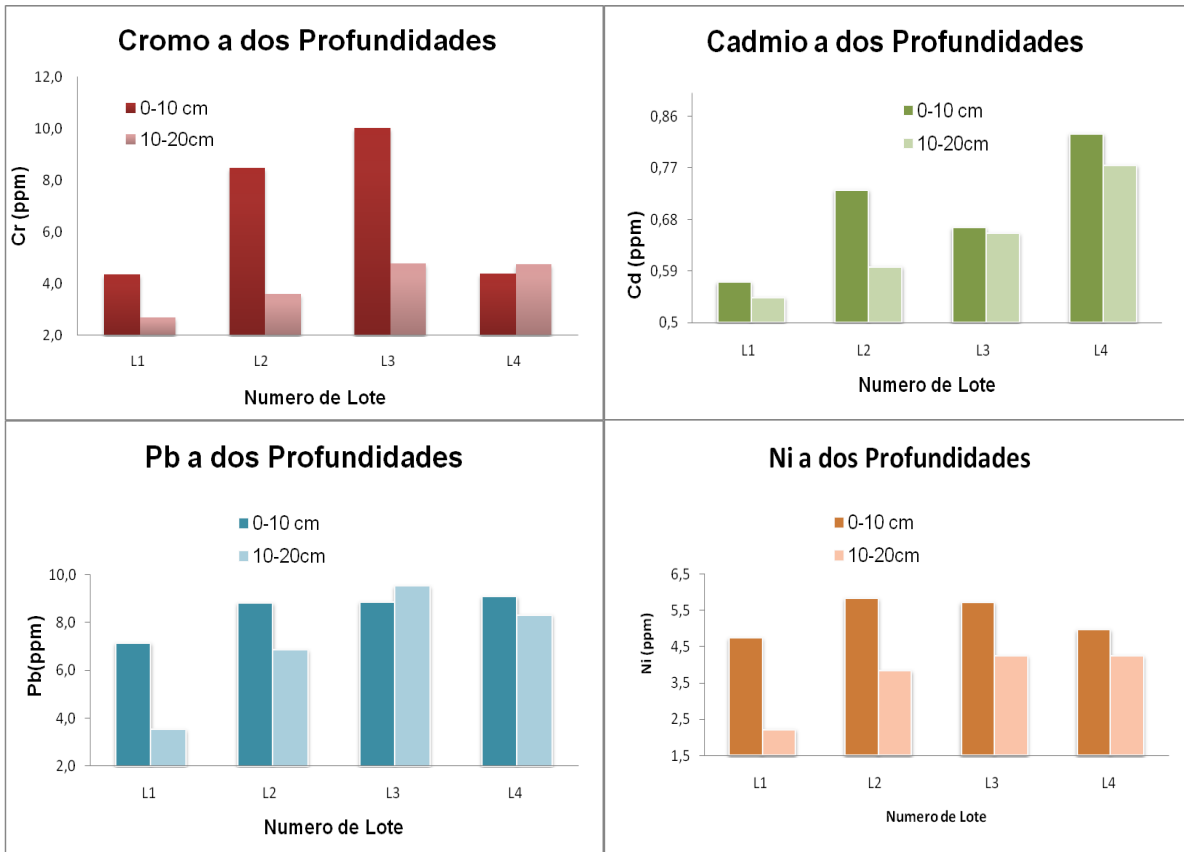


Figura 15. Concentración de metales pesados en suelo testigo.

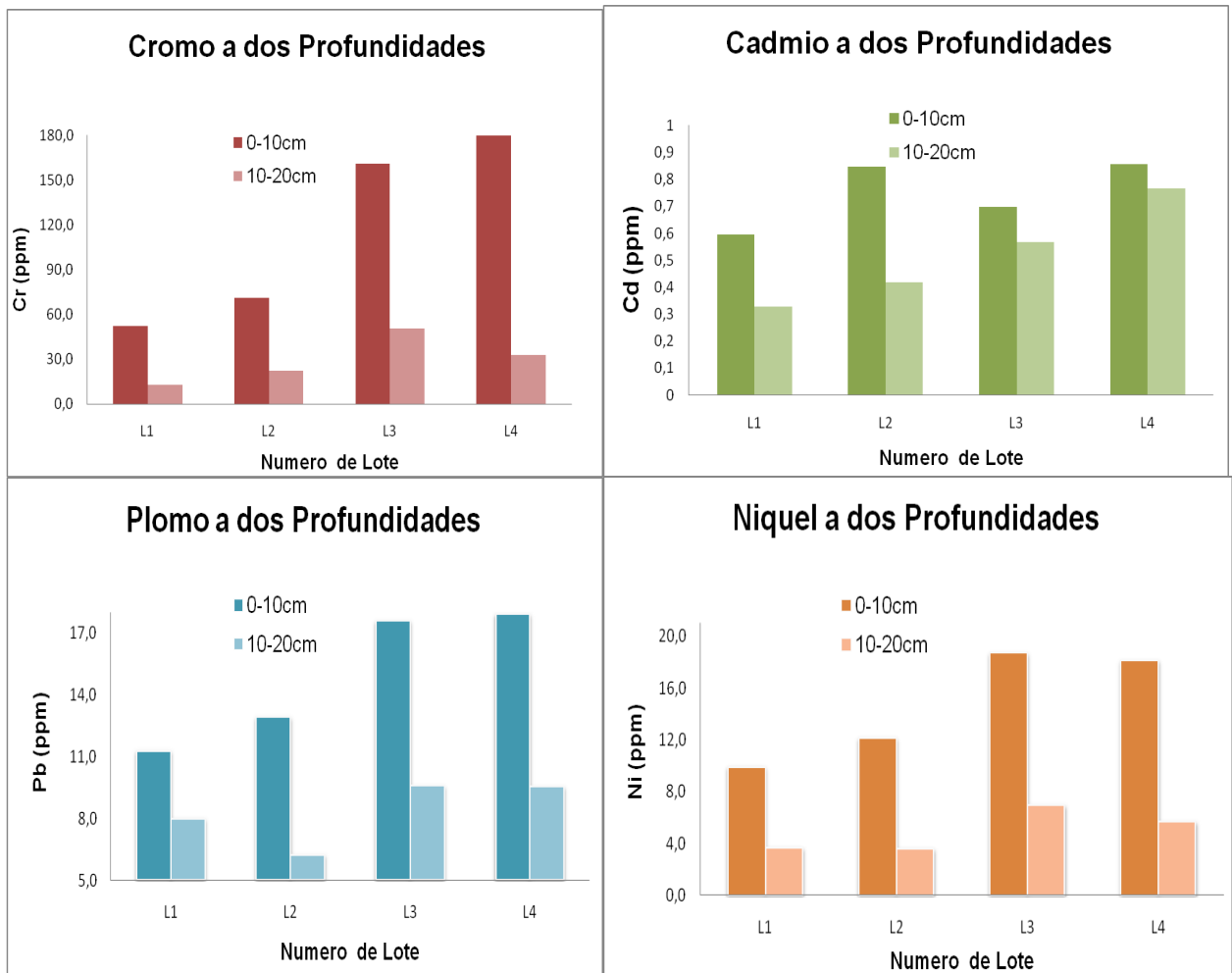
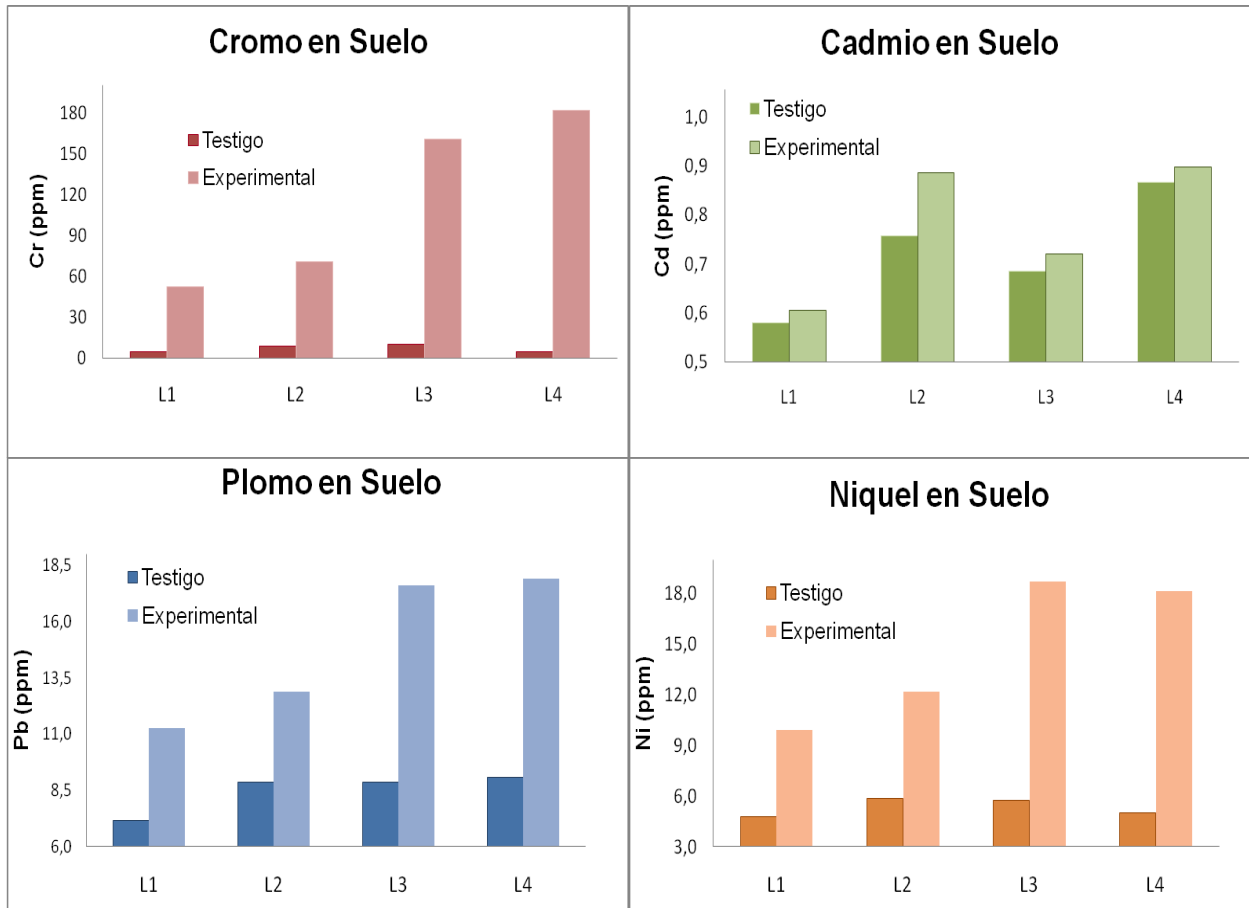


Figura 16. Concentración de metales pesados en suelo experimental

Después de observar la movilidad de los metales a través de los primeros 20cm de suelo, se comparó la concentración de dichos metales en las dos parcelas, (testigo y experimental), a una profundidad de 10cm con el objetivo de observar el efecto de la aplicación de Biosólido sobre la concentración de metales pesados en el suelo. La figura 17 presenta las concentraciones en las dos parcelas estudiadas, esta figura permite concluir que los metales pesados de estudio, presentan una concentración mayor en el suelo experimental (suelo aplicado con Biosólido) que en el suelo testigo; este comportamiento indicó que fuentes antropogénicas elevan el contenido de metales en el suelo, es decir que la aplicación de Biosólidos causa un incremento en el contenido de metales pesados en el suelo.



#L= numero de lote de cada parcela

Figura 17. Concentración de metales pesados en suelo testigo y experimental.

6.3 Análisis Foliare: efecto del biosólido sobre el contenido nutricional y contenido de metales pesados de los pastos.

- **Análisis Químico:** Después de analizar el suelo se analizó el pasto. El anexo 3 tabla 7 y 8 presenta los análisis tanto de contenido de nutrientes como de metales pesados en pasto. La figura 18 permite observar un ligero incremento en el contenido de nutrientes en los pastos provenientes del suelo al que se aplica Biosólido.

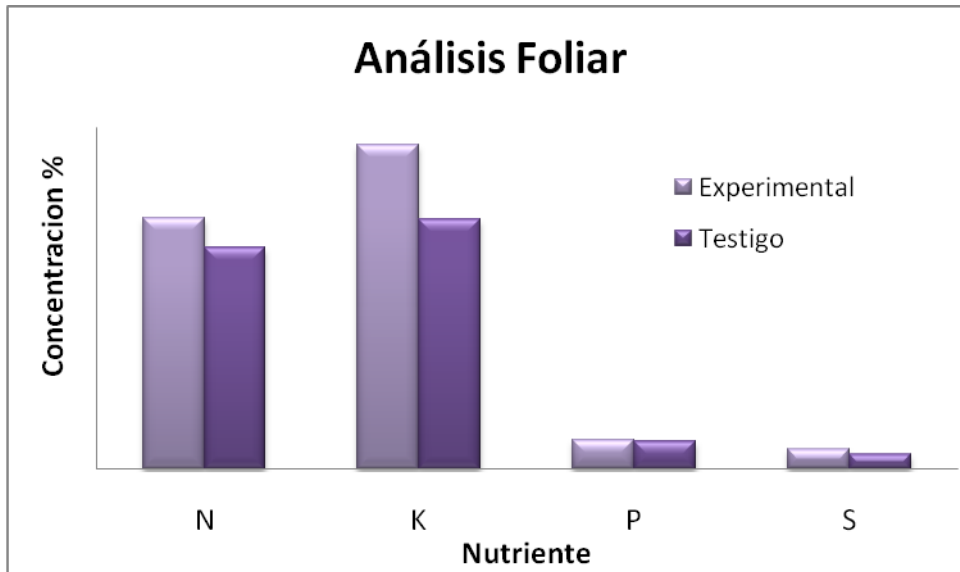
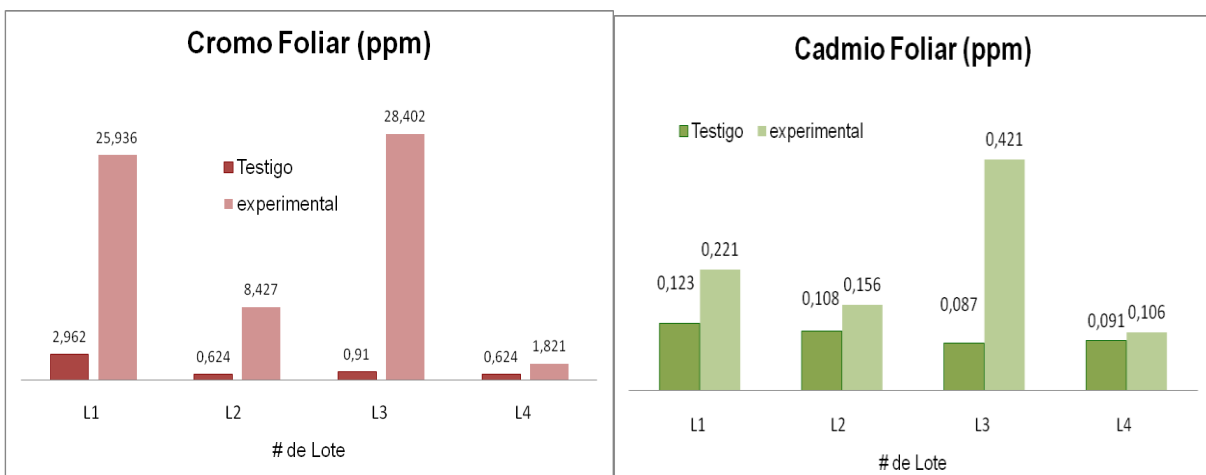


Figura 18. Porcentaje de algunos nutrientes en parcela Testigo y Experimental

- **Análisis de Metales Pesados**

En las figura 19 se observa que el pasto de la parcela aplicada con biosólido (experimental) presenta mayor contenido de metales pesados que la parcela testigo, El cromo presenta la mayor concentración de metal con respecto al testigo, de manera general los contenidos encontrados en las pastos evaluados, sugieren que éstos, presentan una capacidad de fijación y acumulación de metales pesados en sus tejidos, que imponen restricciones y seguimientos, así como tasas de aplicación controladas para evitar que se pueda llegar a niveles fitotóxicos o zootóxicos (Behel., et al, 1983). Este resultado muestra el gran inconveniente de la aplicación de biosólidos con estas características.



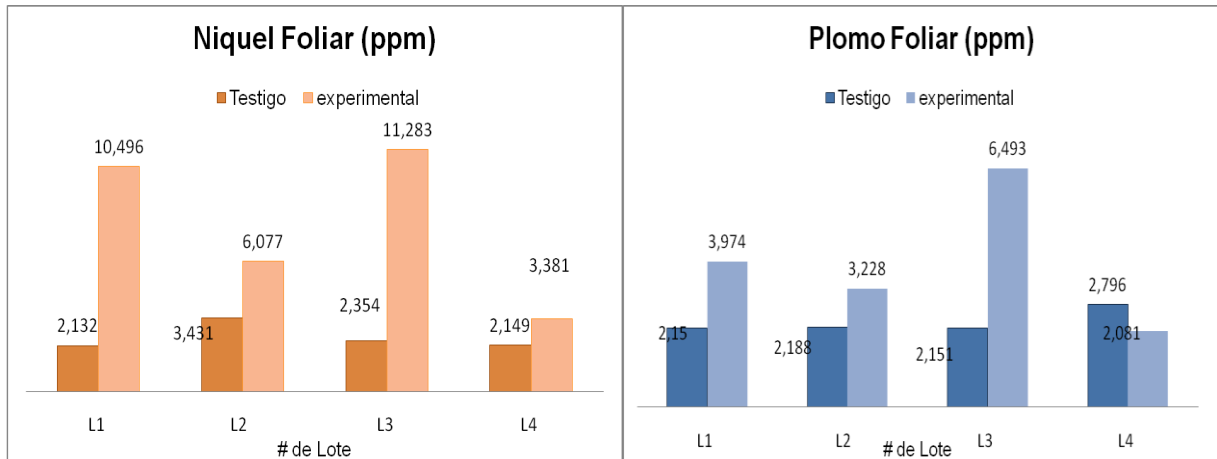


Figura 19. Concentración de metales pesados en muestras foliares de las parcelas Testigo y Experimental.

6.4. Análisis del Efecto del Biosólido sobre el contenido de metales pesados en Aguas:

Las fracciones solubles e intercambiables son las más importantes asociadas a la contaminación de las aguas subterráneas y para la nutrición de las plantas, sin embargo, el movimiento de los metales en los suelos aplicados con biosólidos depende de la composición de los lodos.

El anexo 4 tabla 9 presenta la concentración de metales pesados en las aguas recogidas en los diferentes lotes tanto de la parcela testigo como experimental.

En las figuras 20, 21, 22 y 23 se representa las concentraciones de metales pesados en cada uno de los equipos empleados para recoger aguas a diferentes profundidades, tanto en la parcela testigo como experimental. Se observa que, la concentración de metales no presenta una relación con la profundidad de las aguas en el suelo, debido a la ligera movilidad de dichos metales a través del suelo. Cabe aclarar que estos datos son demostrativos ya que están por debajo de los valores permitidos por la EPA.

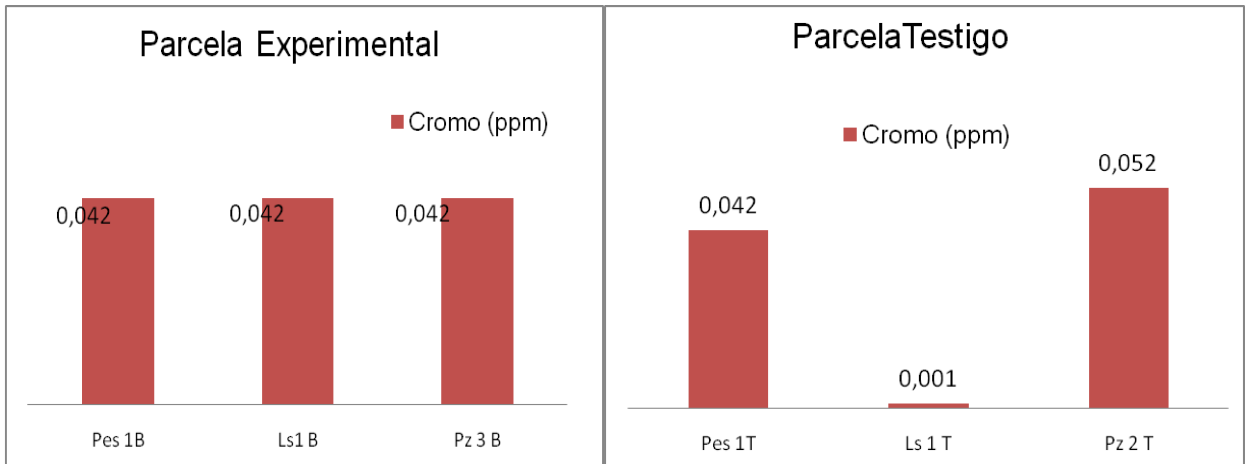


Figura 20. Concentración de Cromo en aguas de escorrentía de los lisímetros y piezómetros de parcelas testigo y experimental

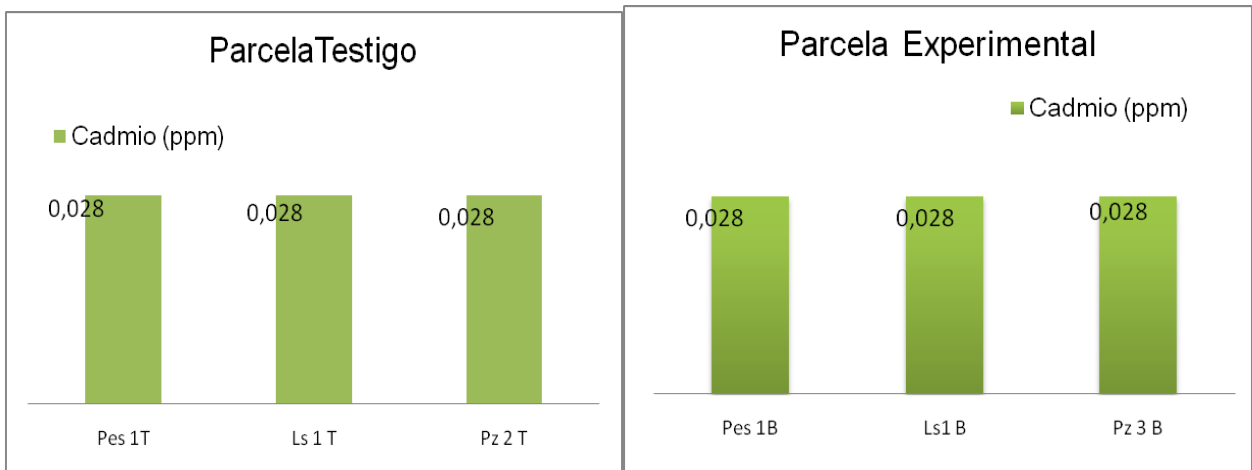


Figura 21. Concentración de Cadmio en aguas de parcelas testigo y experimental a diferentes profundidades

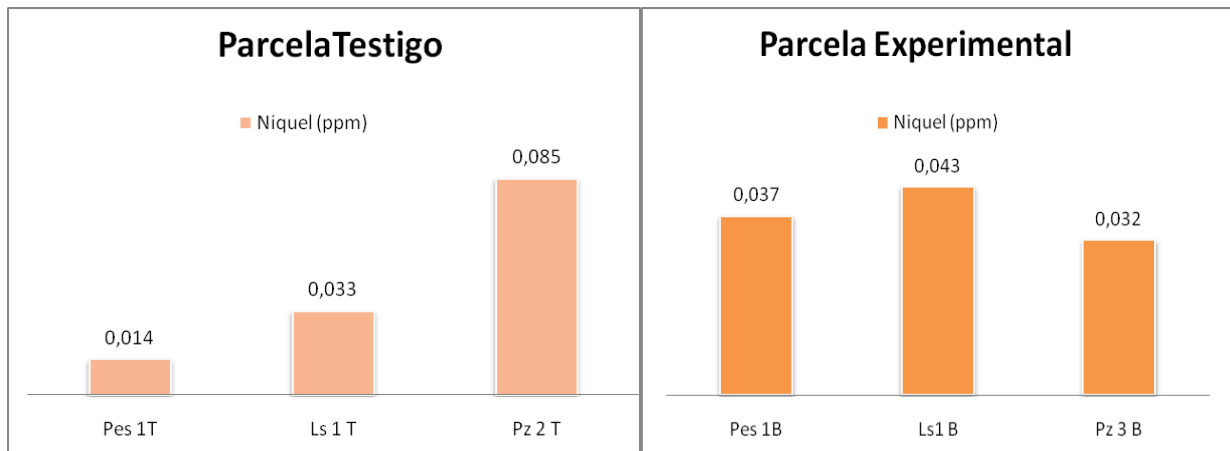


Figura 22. Concentración de Níquel en aguas de parcelas testigo y experimental a diferentes profundidades

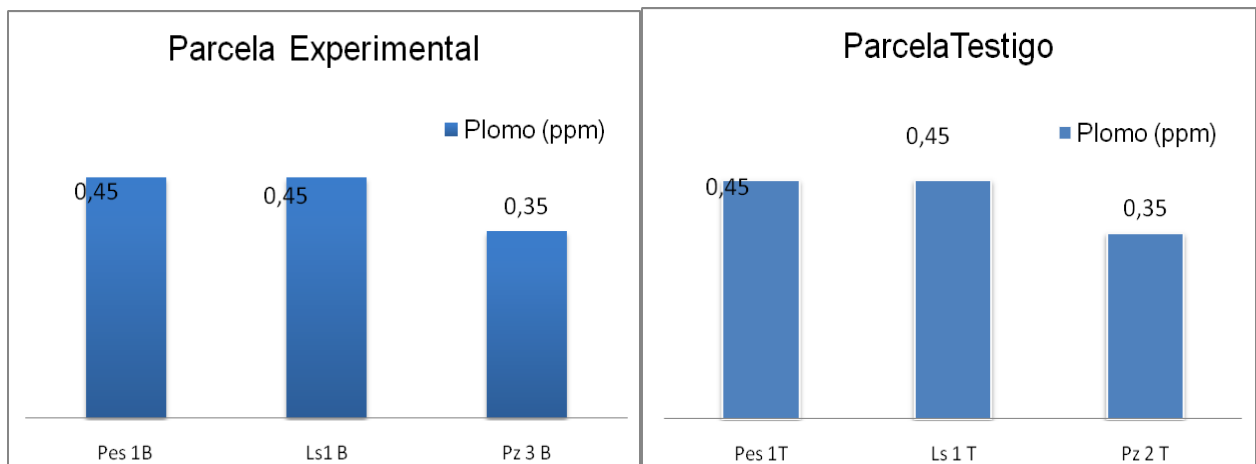


Figura 23. Concentración de Plomo en aguas de parcelas testigo y experimental a diferentes profundidades

Después de analizar el contenido de metales en las aguas de diferentes profundidades, se analizó, si la aplicación de biosólido incremento la concentración de dichos metales en las aguas recogidas a diferentes profundidades en la parcela experimental, las figuras 24, 25 y 26 permite comparar el contenido de metales en aguas, a diferentes profundidades. De forma general se encontró que la aplicación de Biosólidos no genera un aumento en la concentración de los metales pesados analizados, efecto que se puede atribuir a que los metales pesados se han distribuido entre los componentes del suelo y su asociación con ellos ha dado lugar a formas químicas complejadas por los óxidos de hierro y por la materia orgánica, adsorbiendo los metales, generando la disminución de su movilidad hacia las aguas subterráneas.

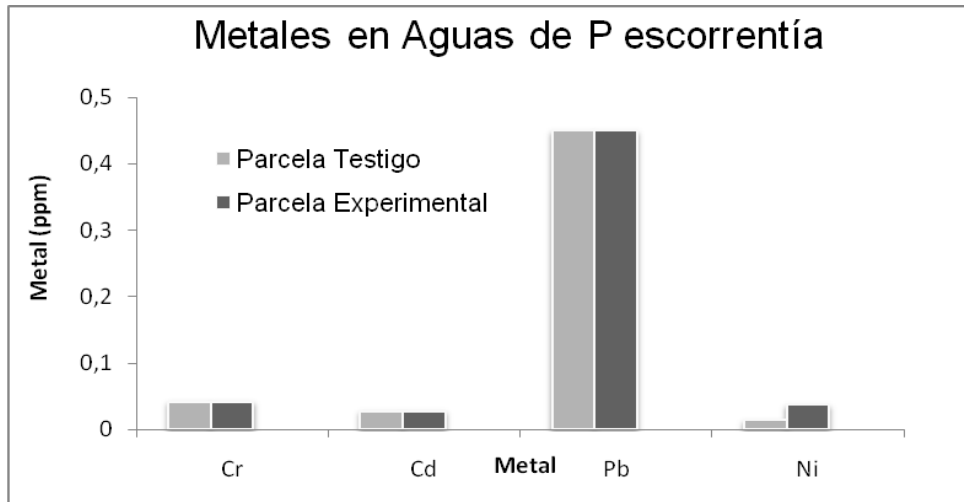


Figura 24. Metales pesados en aguas de lisímetros en parcela testigo y experimental

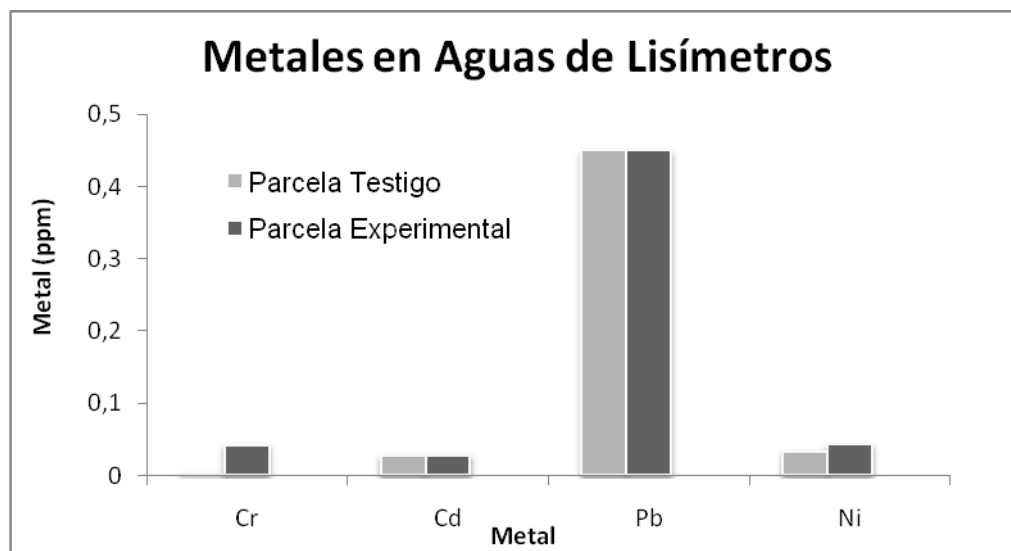


Figura 25. Metales pesados en aguas de lisímetros en parcela testigo y experimental

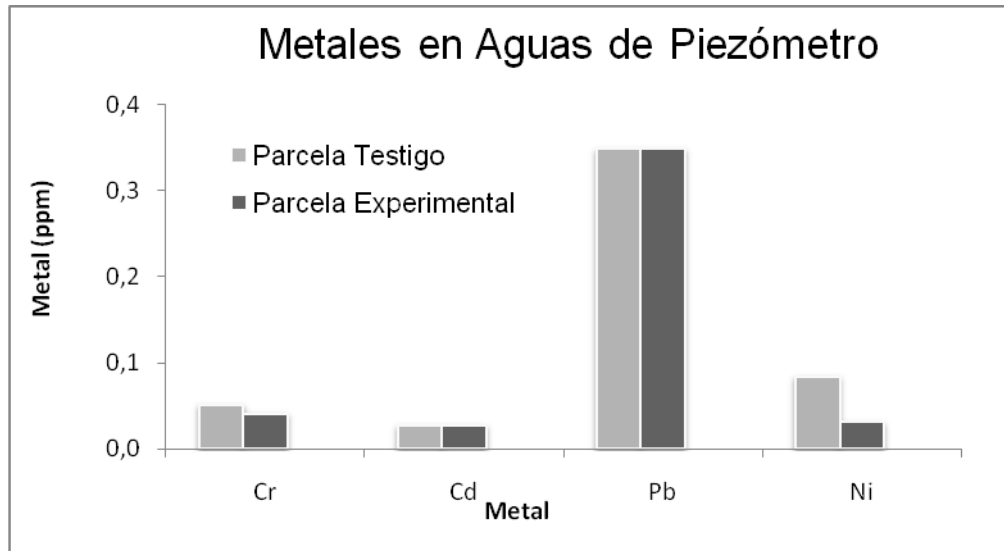


Figura 26. Metales pesados en aguas de piezómetros en parcela testigo y experimental

Una recopilación de los análisis hasta aquí realizados del conjunto dinámico Suelo-Planta-Biosólido permite concluir que los metales están siendo retenidos por los coloides del suelo, materia orgánica y óxidos de hierro u otros metales, en los primeros 20 cm siendo más acentuada en los primeros 10cm hecho por lo cual no se encuentran incrementos en los contenidos de metales en las aguas a medida que aumenta la profundidad de muestreo, es decir que los metales estudiados no se movilizan a los cuerpos de agua, pero sí pasan a la planta, como se muestra en muestras foliares, reflejando su capacidad de fijación y acumulación en sus tejidos.

6.5 Isotermas de Adsorción- Desorción

La capacidad de los suelos para retener y liberar metales puede ser un factor importante para predecir el impacto ambiental de la utilización de los Biosólidos, por lo cual se estudió los fenómenos de adsorción y desorción de metales pesados (Pb, Cr, Cd, Ni), tanto del suelo como del Biosólido, utilizando isotermas de Lagmuir.

Dada la gran importancia de los fenómenos de adsorción, y considerando la alta capacidad de retención en los primeros centímetros del perfil del suelo, se evaluó mediante isotermas de adsorción y desorción la energía con que son retenidos y liberados los metales pesados en el suelo.

- Isotermas de Adsorción- Desorción en suelo.

Los resultados de las isotermas realizadas con los diferentes metales es el promedio de tres replicas (tablas 10 anexo 5).

La forma funcional de las isotermas de adsorción (figura 1, anexo 5), tiene un comportamiento caracterizado por un ligero desenso en la pendiente cuando aumenta la concentración en equilibrio tanto para cadmio como para cromo, esto refleja una alta afinidad del adsorbente (metal) por el adsorbato (Suelo) a bajas concentraciones, la cual disminuye al aumentar la concentración. Este comportamiento implica que todos los sitios de adsorción del sedimento son equivalentes e igualmente disponibles para los metales, además de presentar una elevada afinidad por este tipo de suelo.

Los fenómenos de desorción (figura 2, anexo 5), realizados para determinar la fuerza con que está ocurriendo la asociación del metal con la superficie del suelo, se ajustaron a isotermas de Langmuir de igual manera que el fenómeno de adsorción

Valores de b altos ($b > 0,090$), indican que el metal está siendo retenido por la fase sólida a través de reacciones de adsorción. Por el contrario, valores bajos de b indican que una amplia fracción del metal permanece en solución (Gómez et al., 2001). Con respecto a los dos ensayos (adsorción- desorción), las constantes de energía (K) del fenómeno de adsorción son diferentes al inverso de la del fenómeno de desorción, lo que se debe a que los procesos están sufriendo fenómenos histéresis, es decir que los caminos por los cuales se dan los dos fenómenos son diferentes. La energía (K) con que se retiene el metal, es mucho mayor que la energía necesaria para la desorción tabla 11, este fenómeno implica que los exudados de las raíces liberados por la planta son capaces de generar condiciones favorables para que se desorban los metales del suelo y sean absorbidos por los pastos.

Tabla 11. Parámetros de las isotermas de adsorción- desorción utilizando los modelos de Langmuir en suelo sin aplicación de Biosólido.

| Adsorción | | | Desorción | | |
|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Metal | K | b | Metal | K | b |
| Cromo | 0,183 | 0,412 | Cromo | 0,040 | 0,110 |
| Cadmio | 0,209 | 0,373 | Cadmio | 0,056 | 0,083 |
| Níquel | 0,196 | 0,393 | Níquel | 0,048 | 0,097 |
| Plomo | 0,067 | 0,588 | plomo | 0,857 | 0,024 |

b = máxima capacidad de adsorción

K= constante de energía de enlace. (Energía de adsorción)

- Efecto de la aplicación de Biosólido sobre los fenómenos de Sorción del suelo

Después de realizar los modelos de adsorción-desorción que tiene el suelo sin la aplicación de Biosólido, se evaluó el efecto de la adición progresiva de Biosólido sobre la dinámica de los procesos adsorción-desorción.

Los resultados de las isotermas de adsorción y desorción con los diferentes metales para el suelo es el promedio de tres replicas (tablas 10 anexo 5) y se relacionan en las tablas 11-12 del mismo anexo.

En las figuras 3-10 anexo 5 se representan las isothermas de Langmuir tanto del proceso de adsorción como del proceso de desorción de metales pesados. Las curvas obtenidas tienen una forma lineal aunque presentan ligeras curvaturas, que se pueden atribuir a que los coloides del suelo, no presentan sitios de adsorción homogéneos.

6.5.1 Valoración de los parámetros para Langmuir (b) y (K).

- **Adsorción**

En la tabla 12 se presentan los valores de máxima capacidad de adsorción y desorción (**b**), energía de adsorción y de desorción (**K**) y factor de correlación (**r**), obtenidas a partir de la ecuación lineal de Langmuir para los metales de estudio (Cr, Cd, Pb, Ni).

El análisis estadístico para cada uno de los metales, ANOVA de un Factor y Prueba de comparación múltiple de Tukey muestran que hay diferencia significativa entre los diferentes tratamientos aplicados (Tabla 13 anexo 5).

Tabla 12. Valores b, K y r^2 para Langmuir en el suelo fortificado con cromo, cadmio, níquel y plomo.

| Metal | Sustrato Ton Bios/Ha Suelo | Adsorción | | Desorción | |
|--------|-------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | | K | b | K | b |
| Cromo | 0 | 0,183 | 0,412 | 0,040 | 0,110 |
| | 3 | 0,112 | 0,474 | 0,699 | 0,004 |
| | 6 | 0,106 | 0,482 | 0,376 | 0,019 |
| | 9 | 0,082 | 0,540 | 0,086 | 0,063 |
| Cadmio | 0 | 0,209 | 0,373 | 0,056 | 0,083 |
| | 3 | 0,095 | 0,499 | 0,442 | 0,011 |
| | 6 | 0,083 | 0,542 | 0,076 | 0,054 |
| | 9 | 0,053 | 0,635 | 0,061 | 0,061 |
| Níquel | 0 | 0,107 | 0,533 | 0,126 | 0,045 |
| | 3 | 0,104 | 0,536 | 0,114 | 0,042 |
| | 6 | 0,101 | 0,553 | 0,074 | 0,051 |
| | 9 | 0,087 | 0,567 | 0,069 | 0,053 |
| Plomo | 0 | 0,067 | 0,588 | 0,857 | 0,024 |
| | 3 | 0,064 | 0,607 | 0,822 | 0,029 |
| | 6 | 0,057 | 0,629 | 0,091 | 0,040 |
| | 9 | 0,052 | 0,556 | 0,052 | 0,053 |

En las figuras 27 y 28 se puede observar que la máxima capacidad de retención (**b**) en el suelo, aumenta con el incremento de la dosis de Biosólido aplicado, esto significa que la retención del cromo, cadmio, níquel y plomo, empieza a ser mucho mayor con el aumento de Biosólido, este patrón que sigue el proceso de adsorción se produce por la

alta afinidad de los metales a la matriz de Biosólido McBride et al. (2000), ya que la aplicación de este, aumenta la materia orgánica del suelo, aumentando el número de sitios de adsorción para los metales (Mad., et al, 1994) aumentando el número de grupos que pueden quelatar dichos metales. En cuanto a la energía de adsorción (**K**) que es la energía con la que está retenido el metal en el suelo, se observó que es superior para el suelo sin adición de Biosólido que para el suelos al que se le ha aplicado Biosólido, y a medida que esta dosis aumenta esta energía se hace cada vez más débil, este comportamiento posiblemente se deba a la competencia que ocurre entre los otros iones que componen el Biosólido y que interaccionan principalmente con la MOS, disminuyendo el número de sitios de adsorción en la superficie del suelo e incrementando el desgaste por la competencia generada.

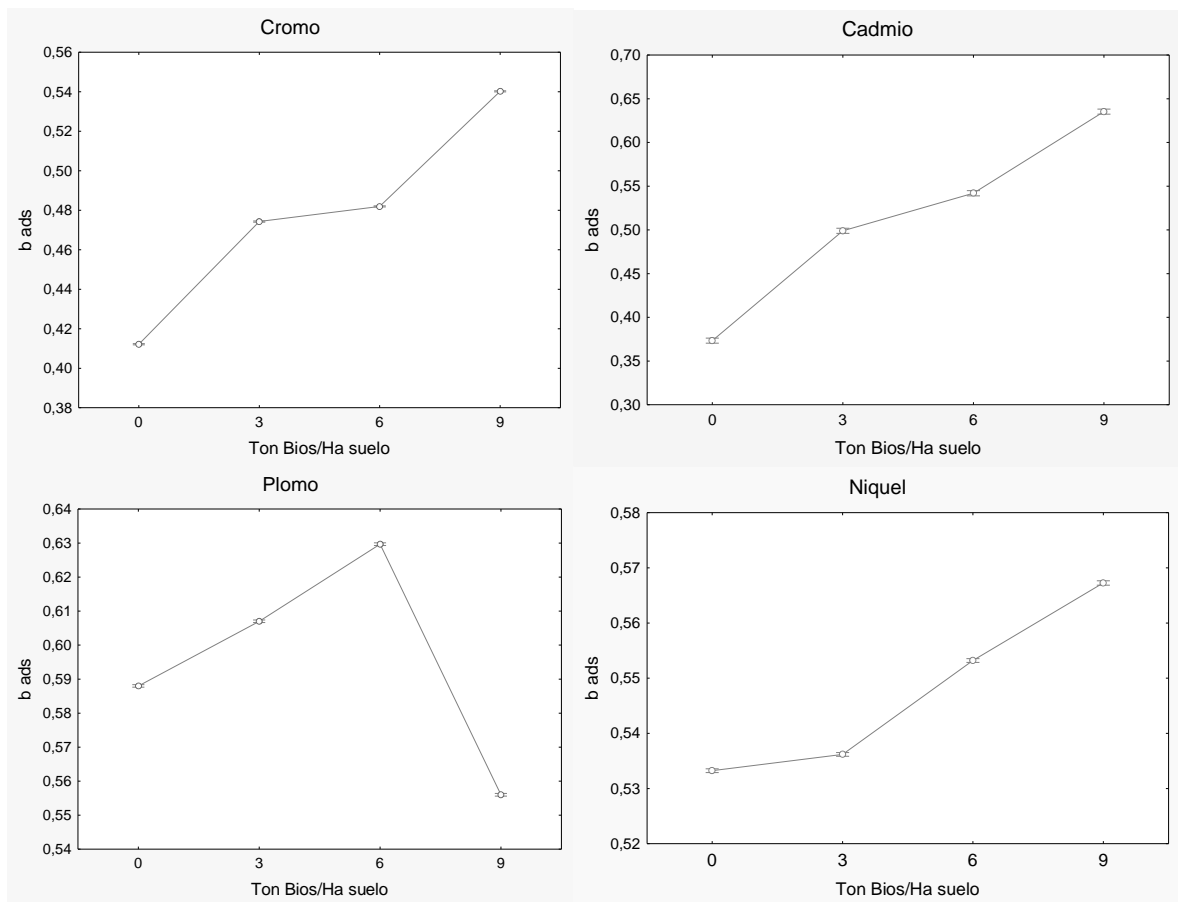


Figura 27. Máxima capacidad de adsorción para cromo, cadmio, níquel y plomo.

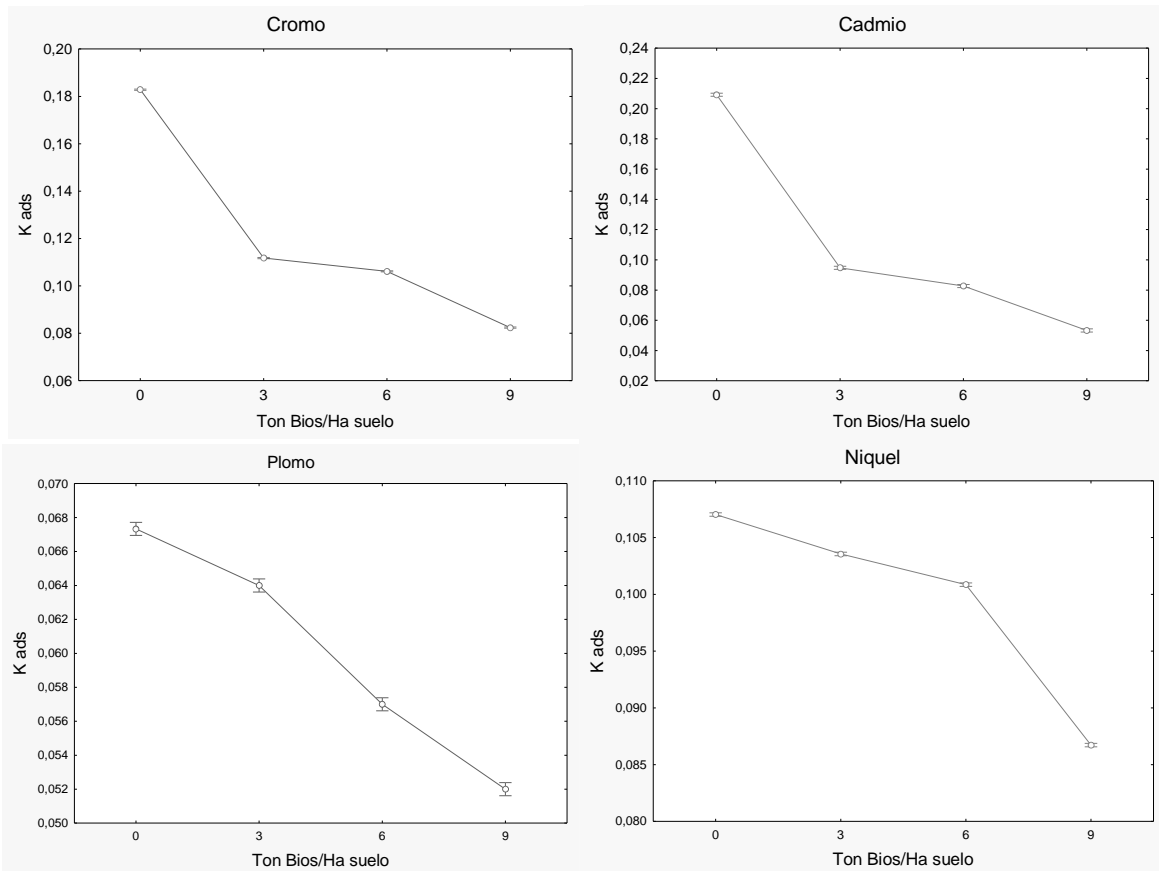


Figura 28. Energías de adsorción para cromo, cadmio, níquel y plomo.

- **Desorcion**

La constante K del proceso de desorción, figura 29, revela que la fuerza con la que se retienen los metales empieza a disminuir, con la adición progresiva de biosólido, esta disminución causa que los metales sean liberados más eficientemente a la solución del suelo, es decir que la adición progresiva de Biosólido genera mayor biodisponibilidad de metales pesados para la planta. El mismo resultado fueron encontrados por Olajire., et al, 2003, quienes estudiaron cuatro suelos tratados con Biosólido, y encontraron que la biodisponibilidad potencial de algunos metales en el suelo aumento con la adición de aguas residuales tratadas.

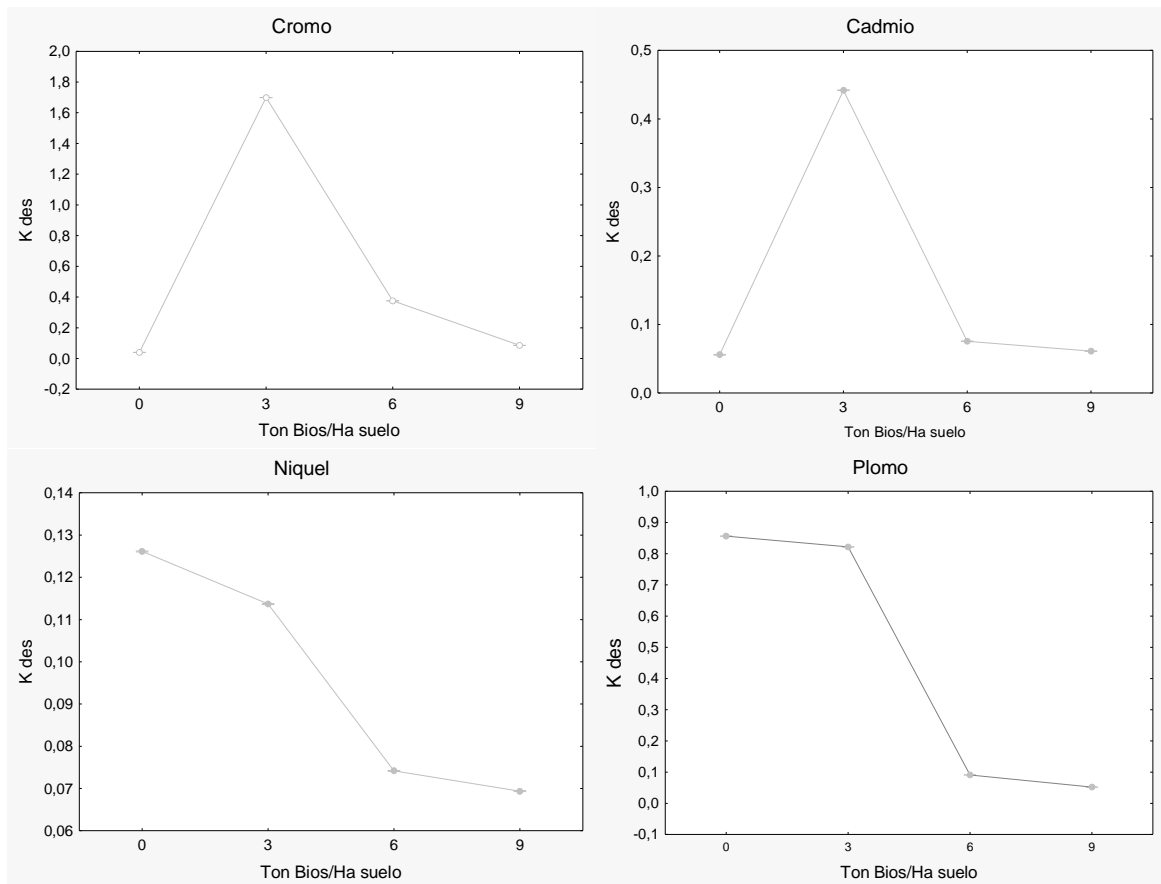


Figura 29. Energías (K) de desorción para cromo, cadmio, níquel y plomo

- Correlación entre coeficientes de transferencia y la Biodisponibilidad de metales pesados (K desorción).

Un parámetro importante después de conocer la concentración de metales disponibles en el suelo y la concentración en la planta (curva de captación), es conocer la cantidad de metal que se transfiere a la planta, y se denomina coeficiente de transferencia, tabla 13. Después de encontrar estos coeficientes los resultados se relacionaron con las energías de desorción de cada uno de los metales Figura 30.

Los coeficientes de transferencia (CT) de Cadmio y Níquel superan los de Cromo y Plomo, esto significa que el pasto Kikuyo tiende a absorber de la solución del suelo mucho más fácil el cadmio y el níquel. Si se observa la grafica de la disponibilidad de metales en el suelo se tiene un orden de desorción ($Cd > Pb > Ni > Cr$), al relacionar este resultado con los coeficientes se puede concluir que un metal que más fácil se desorbe del suelo no es necesariamente el metal mas fácilmente absorbido por la planta, en la absorción influyen no solamente la concentración disponible en solución para la planta

sino el elemento, grado de disponibilidad, la especie vegetal y la interacción con macronutrientes (Felipo 1995, Salgado 2004, Priit et al 2007)

Tabla 13. Coeficientes de transferencia de metales pesados del sistema suelo-planta

| Coeficientes de Transferencia | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| # Lote | Cr | Cd | Pb | Ni |
| 1 | 0,496 | 0,371 | 0,353 | 1,056 |
| 2 | 0,119 | 0,184 | 0,250 | 0,499 |
| 3 | 0,176 | 0,603 | 0,369 | 0,603 |
| 4 | 0,010 | 0,124 | 0,116 | 0,186 |
| Promedio | 0,200 | 0,321 | 0,272 | 0,586 |

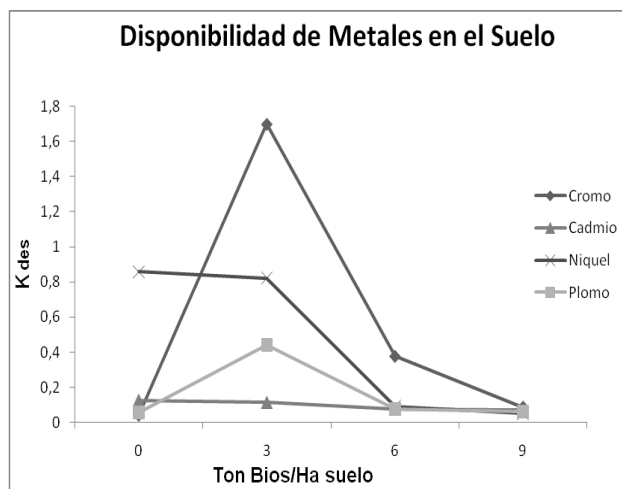


Figura 30. Energías de desorción de cromo, cadmio, níquel y plomo bajo diferentes dosis de biosólido aplicado.

6.6 Análisis de actividad Respirométrica

Con el fin de determinar el proceso de degradación de la materia orgánica del suelo, se realizó un análisis de la cinética que sigue la reacción de producción de CO₂ a diferentes niveles de aplicación de Biosólido.

Tradicionalmente las propiedades químicas y físicas de los suelos han sido utilizadas como una forma de evaluar la productividad de los suelos. Sin embargo, en los últimos tiempos han aumentado las evidencias que indican que determinados parámetros biológicos del suelo son eficientes indicadores tempranos y muy sensibles de suelos degradados, manejados y/o recuperados. Entre tales parámetros destacan la biomasa microbiana, la mineralización del C determinada como CO₂ (respiración del suelo) y diversas enzimas producidas por los organismos presentes en el suelo. La biomasa microbiana relacionada al contenido de materia orgánica (MO) de un suelo, constituye

la fracción viva de éste, y resulta ser un buen índice para comparar ecosistemas naturales y degradados (Reginatto 2003).

Con los resultados obtenidos anexo 6 (tabla 14) se determinó mediante el método gráfico de rapidez integrado, que la cinética de todas las dosis aplicadas es de orden cero. Anexo 6 (figura 11) representa la cinética de orden cero para cada una de las dosis de Biosólido aplicada. El análisis estadístico ANOVA de un factor y Prueba de comparación múltiple Tukey, anexo 6 (tabla 16), muestra diferencia significativa en la cantidad de CO₂ producido en función de las dosis progresivas de Biosólido aplicada. El orden cero de esta reacción indica que la velocidad es independiente de la concentración inicial.

6.6.1 Valoración de los parámetros cinéticos de respirometría

Después de determinar el orden cero de la reacción se extrapolaron en cada una de las dosis, en t=0 horas con el objeto de encontrar los miligramos de CO₂ producidas a un tiempo cero, los resultados de las cinéticas (K y mg CO₂ t=0) de las diferentes dosis de Biosólido aplicado al suelo es el promedio de seis replicas anexo 6 (tabla 15) y se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Cantidad de CO₂ producido a tiempo cero en diferentes dosis de Biosólido aplicado.

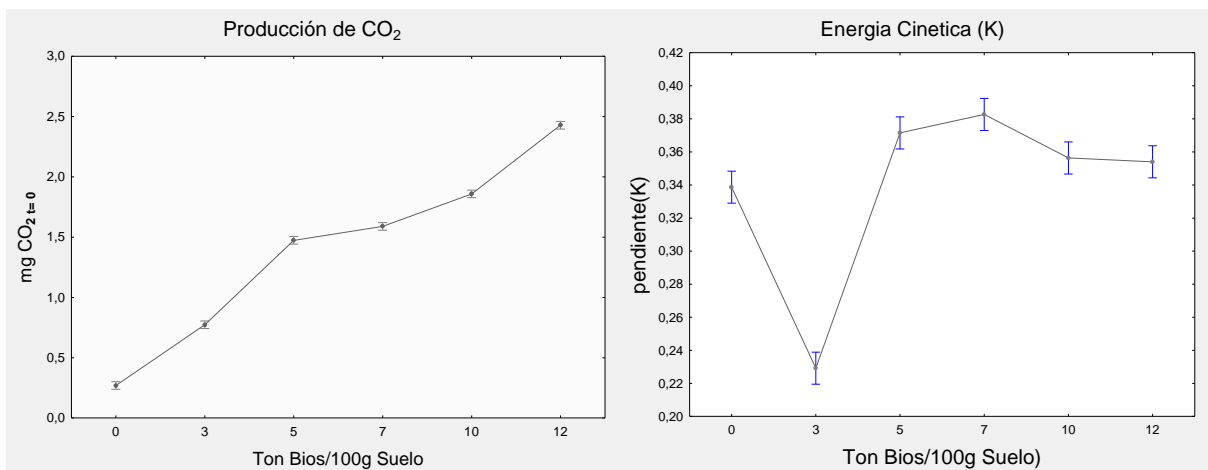
| Ton Bios/100g Suelo) | Pendiente(K) | mg CO₂ t= 0 |
|-----------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 0 | 0,339 | 0,270 |
| 3 | 0,229 | 0,774 |
| 5 | 0,372 | 1,474 |
| 7 | 0,383 | 1,589 |
| 10 | 0,356 | 1,859 |
| 12 | 0,354 | 2,429 |

El modelo al que se ajusta los parámetros de la cinética de producción de CO₂ es un modelo lineal en el cual los mg de CO₂ en t=0h aumenta con el aumento de la dosis de Biosólido aplicada

Las velocidades y miligramos de cada una de las dosis aplicadas se muestran en la figura 27. Con respecto a las velocidades (gráfico derecho) se observó una disminución en dicha velocidad con la primera dosis aplicada, con las dosis siguientes esta velocidad aumenta incluso respecto a la velocidad del suelo sin aplicación. La producción de CO₂ tuvo un comportamiento proporcional con respecto a la dosis de Biosólido aplicado a tiempo cero, lo que significa que la incorporación de materiales orgánicos, Biosólidos, permite que el suelo adquiera condiciones que favorecen la actividad microbiana e incrementan la actividad enzimática, la cual tiene participación esencial en los ciclos biogeoquímico de los elementos (O, C, N, S, P), estimulando la

descomposición de la materia orgánica ya presente en el suelo. Esta pérdida de materia orgánica, es una consecuencia negativa, pues la pérdida de materia orgánica nativa deteriora las propiedades del suelo, ocasionando pérdidas de estructura, disminución de la infiltración, erosión laminar, pérdida de estabilidad de los agregados del suelo y una muy importante disminución de los sitios activos, importantes en suelos con aplicación de biosólidos pues estos son los sitios que proporcionan al suelo la capacidad de retener metales tóxicos.

Figura 27. Cinética de reacción de producción de CO₂ a t=0 a diferentes dosis de biosólido aplicado.



7. Discusión Global

El contenido de metales pesados en los biosólidos aplicados a suelos fue muy bajo excepto la concentración de cromo con respecto a lo propuesto por la EPA. Esto está relacionado al tipo de residuos y el tratamiento de aguas residuales que se hace en la planta San Fernando. La cantidad de metales pesados presentes aunque es baja aumenta el contenido de metales pesados de origen parental que existen en el suelo, y los que han sido absorbidos por la planta. Cabe resaltar que este aumento del contenido de metales en el suelo no facilita su movilización a través del perfil del suelo, esto significa que el incremento de metales pesados por biosólidos posiblemente no contamina los cuerpos de agua.

La naturaleza coloidal del suelo determina la retención de los metales, inicialmente una cantidad de metal adicional es retenida cuando se adiciona biosólido ya que se incrementa la materia orgánica, incrementando también el número de sitios activos capaces de retener iones. Inicialmente esta capacidad de retención involucra una acumulación de metales en los primeros centímetros del suelo tal como se observó con los resultados de los análisis de suelos donde se encontró concentraciones mayores en los primeros centímetros del perfil del suelo. En principio se pensaría que estos resultados y los obtenidos en los análisis de aguas disminuyen el posible riesgo ambiental generado por los biosólidos, pero los ensayos también demostraron que la aplicación de biosólidos incrementa el contenido de metales en la planta. Por esta razón, los estudios de los fenómenos de sorción en el suelo que se realizaron mediante las isotermas de adsorción-desorción son importantes a la hora de determinar los efectos reales de los biosólidos. Los resultados de este análisis demuestran que la fertilización mediante biosólidos, no solo incrementa los contenidos de metales en el suelo, sino que, además incrementan la tasa de liberación (disminución de la energía de adsorción) de metales hacia la solución donde quedan fácilmente disponibles para la planta.

Los modelos cinéticos de desorción fueron diferentes para los cuatro metales. Lo que pone de manifiesto los distintos mecanismos de adsorción y desorción que actúan. Estos modelos también manifestaron un orden de desorción de $Cd > Pb > Ni > Cr$, que al relacionarse con el orden de los coeficientes de transferencia (relación entre la cantidad de metal disponible y el tomado por la planta) $Ni > Cd > Pb > Cr$, permitieron concluir que, la facilidad con que la planta absorbe metales de la solución del suelo no solo está limitada por la concentración en que se encuentren en la solución del suelo.

Con los resultados obtenidos hasta este punto se logró establecer que los biosólidos si incrementan los niveles de metales pesados en el suelo y que en el periodo de evaluación no se detectó contaminación de las aguas. De esta manera los biosólidos son facilitadores de los procesos de desorción posibilitando la absorción de metales por la planta.

Finalmente mediante el análisis de las tasas de respiración se logró conocer que hay un incremento en la tasa de respiración microbial del suelo cuando se aplican elevadas dosis de biosólido lo cual puede poner en riesgo la materia orgánica nativa del suelo. Esto afectaría a largo plazo la estabilidad estructural por lo que debe ser objeto de una mayor investigación.

8. Conclusiones

- Las concentraciones de cadmio, níquel y plomo en el Biosólido proveniente de la planta san Fernando del departamento de Antioquia fueron inferiores a los límites críticos autorizados para el uso agrícola de Biosólidos establecido por la EPA, el único metal que supera este límite es el cromo.
- Los análisis físicos y químicos de los suelos estudiados evidencian que los Biosólidos son alternativas atractivas desde el punto de vista agrícola por su riqueza en N,P,K y micronutrientes los cuales son aportados al suelo.
- El análisis de metales pesados en suelos indica la presencia de metales pesados, provenientes de su material parental, pero la adición de Biosólidos incrementa dichas concentraciones.
- Los metales pesados se acumulan en los primeros 20 cm de profundidad, afectando el sistema suelo- planta, pues dicha presencia en los primeros centímetros facilito la absorción de metales por la planta.
- El análisis de metales pesados en las aguas subterráneas evidencio que no hubo ningún movimiento de Cromo, Cadmio, Níquel y plomo por el perfil del suelo, este hecho desde el punto de vista ambiental es muy importante ya que significa que los Biosólidos no están contaminando los cuerpos de agua.
- Mediante los modelos de Langmuir para las isotermas de adsorción se concluyo que la aplicación continua y progresiva de Biosólido, aumenta los sitios de adsorción y una adición no controlada aumenta las formas lábiles de éstos y por tanto su disponibilidad.
- La biodisponibilidad de los metales estimados a través de modelos de Langmuir para procesos de desorción se correlacionaron con los coeficientes de transferencia y permitió concluir que la absorción de metales por la planta está condicionada no solo por la concentración del metal disponible si no por la interacción de la planta con los nutrientes y elementos que pueden ser absorbidos.
- Con respecto a la cantidad de CO₂ producida de la respiración del suelo, se presentó un incremento durante la adición de Biosólido debido probablemente a la elevada

actividad enzimática generada por el aumento poblacional de microorganismos que contribuyen no solo a la degradación de materia orgánica aplicada, si no a la degradación de materia orgánica nativa del suelo, elevando las tasas de respiración de suelo que termina en pérdidas importantes en las propiedades físicas del suelo.

- En general este estudio recomienda un control más estricto del uso de los Biosólidos, aunque representen un atractivo agronómico por su riqueza de nutrientes la presencia de metales, su fácil desorción, grado de absorción por las plantas, y muy importante el efecto Priming que causa por pérdida paulatina de materia orgánica nativa, obliga a ser precavidos en su adición al suelo.
- Aunque la aplicación de Biosólidos no representa un peligro desde el punto de vista de no contaminación de los cuerpos de agua, este estudio ratifica la necesidad de monitoreo permanente y de atención a las condiciones locales y el comportamiento del suelo, siendo los experimentos de campo y de largo plazo la única vía de conocer el efecto acumulativo y residual de la aplicación de los metales presentes en los Biosólidos.

BIBLIOGRAFIA

1. ÉNERGIE, L. 2001. Los biosólidos del tratamiento municipal y su uso en la agricultura. Ademe-Agence de l'Environnement et de la Maîtrise. Saskatoon, Canadá.
2. GARCÍA, G. Manejo y uso de biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando. Letras jurídicas. Vol. 9, No. 2 p. 215-224. 2004 Medellín.
3. DAGUER, G. P. 2003. Gestión de biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre. En: Curso Internacional de Restauración Ecológica de Canteras y Uso de Biosólidos.
4. TCHOBANOGLUS, G.; THEISEN, H. y VIGI, S. Gestión integral de residuos sólidos Vol. 1 y 2. Madrid: McGraw Hill, 1994.
5. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. FEDERAL REGISTER. Title 40— Protection of Environment: part 503--Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 2002.
6. STEVERSON, F. 1982. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: Wiley. p 442.
7. KONONOVA M.M. 1961. Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Pergamonn Press. Oxford. p 113.
8. KUMADA, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo. P. 241
9. JARAMILLO D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. P.119
10. CAMPBELL D.J.& BECKETT P.H.T. 1998. The soil solution in a soil treated with digested sewage sludge. J. Journal Soil Science. Vol 39 p. 283-298.
11. SCHNITZER M. 1991. Soil organic matter - The next 75 years. Soil Science. 151: 58 -41
12. USMAN A.R.A., KUZYAKOV Y, and STAHR K. Sorption, Desorption, and mobilization of Heavy Metals by Artificial Soil. Institute of Soil Science and Land Evaluation, University of Hohenheim, D-70593.1998.

13. LAHAV, N. , S. LEVI, A. BRISSE, Y. CHEN y S. GIL (1967). Isolation. Of equilibrium solution from wet soil or clay paste.
14. HARTER, R.D. Y SMITH, G. 1981. Langmuir equation and alternate methods of studying “adsorption” reactions in soils. in Chemistry in the Soil Environment. American Society of Agronomy. p .167-182.
15. KABATA PENDÍAS A. 1995. Agricultural Problems Related to Excessive Trace Metal Contents of Soils. En: Heavy Metals. Ed: W. Salomons, U.Forstner, P.Mader. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pag. 3-18.
16. GUSTAVO I. GARCÍA MONTOYA. Calle 85b 43 – 13 Itagüí Gestión Biosólidos, Planta De Tratamiento Aguas Residuales San Fernando, Empresas Publicas De Medellín E.S.P
17. CAVALERI, M. GILMORE, D. MOZAFFARI, M. ROSEN, C. and HALBACH, T. 2004. Hybrid poplar and forest soil response to municipal and industrial byproducts: a greenhouse study. Journal of Environmental Quality. Vol. 3. No. 3. p. 1055-1061
18. ABAD, M. 1998. Aprovechamiento del compost de residuos sólidos urbanos en agricultura. p. 53-66. En: Orozco, F. y Osorio, W., eds. Residuos orgánicos, aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. Medellín: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 151 p.
19. SIDLE, R.C. HOOK, J.E. KARDOS, 1976 L. T. Heavy metals application and plant uptake in a land disposal system for wastewater. Journal of Environmental Quality. Vol.5, p.97-102.
20. ANDERSON, A.; NILSON, K.O 1998. Enrichment of trace elements from sewage sludge fertilizer in soils and plants. Ambio, v.1. p.176-179,.
21. BEHEL D JR, NELSON DW, SOMMERS LE 1983. Assessment of heavy metal equilibria in sewage sludge-treated soil. Journal of environmental quality 12, 181-186.
22. GÓMEZ G. MARTÍN DEL CAMPO M. G. VACA R. LUGO J, ESTELLER, Y GARRIDO E. 2001. Application of municipal sewage sludge in broad bean cultivation (Vicia Faba). Agricultural lands in the Valley of Toluca, México. IWA (International Eater Association) Specialised, Acapulco, Gro. México. 465-469 p.p.

23. Mc. BRIDE, M. B.; BRIAN K., R.; TAMMO, S.; RUSSO, J. J.; SAUVÉ, S. (2mm¹). Mobility and Solubility of Toxic Metals and Nutrients in Soil Fifteen Years After Sludge Application. *Soil Science*. 162 (7): 487-500.
24. MAD LW, SELIM HM (1994) predicting atrazine adsorption-desorption in soils: a modified second-order kinetic model. *Water resour.* 30: 447-456
25. OLAJIRE, A.A. AYODELE, E.T. OYEDIRDAN, G.O. OLUYEMI, E.A. Levels and speciation of heavy metals in soils of industrial southern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.85, p.135-155, 2003
26. FELIPO, M. Reutilización de residuos urbanos y posible contaminación. *Gestión y utilización de residuos urbanos para la agricultura*. Madrid: Editorial Aedos, 1995. p. 23-36.
27. Destino de metales pesados en un suelo tratado con biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas San Fernando” Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 2004.
28. PRIIT., A, UUVE., K, VALTER., P, EILIV., S. Sorption of toxic heavy metals to soil *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, V. 204. p 375-376. 2007.
29. REGINATTO., L. Respiración del suelo como herramienta para evaluar calidad de fondos en acuicultura. I. Desarrollo de un protocolo estándar para medir dióxido de carbono”. 2003 Guayaquil Ecuador. Tesis de grado. (Magíster en ciencias). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar. Disponible en línea en <http://www.cenaim.espol.edu>

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)

Tabla 1. Nivel de MO en suelo.

| Nivel | Bajo | Medio | Alto |
|-------|------|-------|------|
| % MO | < 3 | 3 - 5 | > 5 |

Tabla 2. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH

| pH | Clasificación |
|------------|------------------------|
| 4.0 - 4.5 | Acidez extrema |
| 4.5 - 5.0 | Acidez muy fuerte |
| 5.0 - 5.5 | Acidez fuerte |
| 5.5 - 6.0 | Acidez media |
| 6.0 - 6.5 | Acidez suave |
| 6.5 - 7.0 | Acidez muy suave |
| 7.0 - 8.0 | Alcalinidad suave |
| 8.0 - 8.5 | Alcalinidad moderada |
| 8.5 - 9.0 | Alcalinidad moderada |
| 9.0 - 9.5 | Alcalinidad fuerte |
| 9.5 - 10.0 | Alcalinidad muy fuerte |

Tabla 3. Toxicidad de aluminio en el suelo (S.C.C.S. 2000)

| Al Int. meq /100g. suelo | Evaluación | Efectos tóxicos |
|--------------------------|--|---|
| < 1.5 meq | Bajo | No tóxico |
| 1.6 a 3.0 meq | Medio | Mod. Tóxico |
| > 3.0 meq | Alto | Tóxico, especialmente en leguminosas |
| % Saturación de aluminio | >60 Reducción severa del crecimiento de plantas | 30-60 Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo |
| | | <30 Generalmente no tóxica |

Tabla 4. Clasificación del Suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K

| Nutriente | (meq/100 g suelo) | | |
|-----------|-------------------|-------------|--------|
| | Bajo | Medio | Alto |
| Ca | < 3.00 | 3.00 - 6.00 | > 6.00 |
| Mg | < 1.50 | 1.50 - 2.50 | > 2.50 |
| K | < 0.15 | 0.15 - 0.30 | > 0.30 |

Tabla 5. Disponibilidad del fósforo para el método de Bray II.

| Nivel crítico | Disponibilidad |
|---------------|----------------|
| < 15 ppm | Bajo |
| 15 – 30 ppm | Medio |
| > 30 ppm | Alto |

Anexo 2. Movimiento de metales pesados a través del perfil del suelo**Tabla 6.** Contenidos de metales pesados en suelos de parcela testigo y experimental.

| Muestra | Cr ppm | Cd ppm | Pb ppm | Ni ppm |
|--------------------|--------|--------|---------|--------|
| Suelo testigo | Ppm | | | |
| LOTE1, 0-10 cm. | 4,351 | 0,571 | 7,166 | 4,749 |
| LOTE1, 10-20 cm. | 2,693 | 0,544 | 3,538 | 2,219 |
| LOTE2, 0-10 cm. | 8,488 | 0,732 | 8,842 | 5,843 |
| LOTE2, 10-20 cm. | 3,599 | 0,598 | 6,876 | 3,842 |
| LOTE3, 0-10 cm. | 10,01 | 0,666 | 8,878 | 5,732 |
| LOTE3, 10-20 cm. | 4,790 | 0,656 | 9,543 | 4,256 |
| LOTE4, 0-10 cm. | 4,390 | 0,830 | 9,094 | 4,976 |
| LOTE4, 10-20 cm. | 4,744 | 0,775 | 8,335 | 4,258 |
| Suelo Experimental | | | | |
| LOTE1B, 0-10 cm. | 52,251 | 0,535 | 11,2709 | 9,943 |
| LOTE1B, 10-20 cm. | 12,612 | 0,329 | 7,98516 | 3,700 |
| LOTE2B, 0-10 cm. | 71,072 | 0,570 | 12,902 | 12,172 |
| LOTE2B, 10-20 cm. | 22,042 | 0,419 | 6,226 | 3,635 |
| LOTE3B, 0-10 cm. | 161,05 | 0,688 | 17,5874 | 18,722 |
| LOTE3B, 10-20 cm. | 50,707 | 0,566 | 9,57066 | 6,988 |
| LOTE4B, 0-10 cm. | 181,97 | 0,518 | 17,909 | 18,153 |
| LOTE4B, 10-20 cm. | 33,054 | 0,767 | 9,54351 | 5,711 |

Anexo 3. Análisis de pastos de las parcelas estudiadas

Tabla 7. Análisis foliar pasto Kikuyo

| Parcela | N | P | S | Ca | Mg | K | Fe | Mn | Cu | Zn | B |
|--------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|-----|----|----|------|
| | % | | | | | | g g ⁻¹ | | | | |
| Testigo | 2,92 | 0,37 | 0,20 | 0,35 | 0,30 | 3,3 | 181 | 67 | 6 | 57 | 9,03 |
| Experimental | 3,32 | 0,39 | 0,26 | 0,45 | 0,40 | 4,27 | 371 | 128 | 7 | 74 | 11,5 |

Tabla 8. Análisis de metales pesados en muestras foliares

| Muestra | Cr | Cd | Pb | Ni |
|----------------|--------|-------|-------|--------|
| | Ppm | | | |
| Pasto T, Lote1 | 2,962 | 0,123 | 2,150 | 2,132 |
| Pasto T, Lote2 | 0,624 | 0,108 | 2,188 | 3,431 |
| Pasto T, Lote3 | 0,910 | 0,087 | 2,151 | 2,354 |
| Pasto T, Lote4 | 0,624 | 0,091 | 2,796 | 2,149 |
| Pasto B, Lote1 | 25,936 | 0,221 | 3,974 | 10,496 |
| Pasto B, Lote2 | 8,427 | 0,156 | 3,228 | 6,077 |
| Pasto B, Lote3 | 48,402 | 0,421 | 6,493 | 11,283 |
| Pasto B, Lote4 | 1,821 | 0,106 | 2,081 | 3,381 |

Anexo 4. Movimiento de Metales Pesados en aguas, a través del perfil del Suelo.

Tabla 9. Análisis de metales pesados en aguas de parcelas de escorrentía, Lisímetros y piezómetros

| Muestra | Cr | Cd | Pb | Ni |
|---|-------|--------|-------|-------|
| Concentración en parcelas de Escorrentía (ppm) | | | | |
| Pe 1 Testigo | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,014 |
| Pe 2 Testigo | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,014 |
| Pe 3 Testigo | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,013 |
| Pe 1B | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,037 |
| Pe 2B | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,036 |
| Pe 3B | 0,042 | 0,028 | N.D | 0,037 |
| Concentración en Lisímetros (ppm) | | | | |
| Li 1 Testigo | N.D | 0,028 | N.D | 0,033 |
| Li 2 Testigo | N.D | 0,028 | N.D | 0,033 |
| Li 3 Testigo | N.D | 0,028 | N.D | 0,032 |
| Li 4 Testigo | N.D | 0,028 | N.D | 0,033 |
| Li 1 Experimental | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,043 |
| Li 2 Experimental | 0,043 | 0,028 | 0,45 | 0,043 |
| Li 3 Experimental | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,043 |
| Li 4 Experimental | 0,042 | 0,028 | 0,45 | 0,043 |
| Concentración en Piezómetros (ppm) | | | | |
| P1 Testigo | 0,052 | <0,028 | <0,45 | 0,085 |
| P2 Testigo | 0,052 | <0,028 | <0,45 | 0,085 |
| P1 Experimental | 0,042 | <0,028 | <0,45 | 0,032 |
| P2 Experimental | 0,042 | <0,028 | <0,45 | 0,032 |

Anexo 5. Análisis de la energía y capacidad de fenómenos de Adsorción-Desorción del suelo bajo aplicación progresiva de dosis de Biosólido.

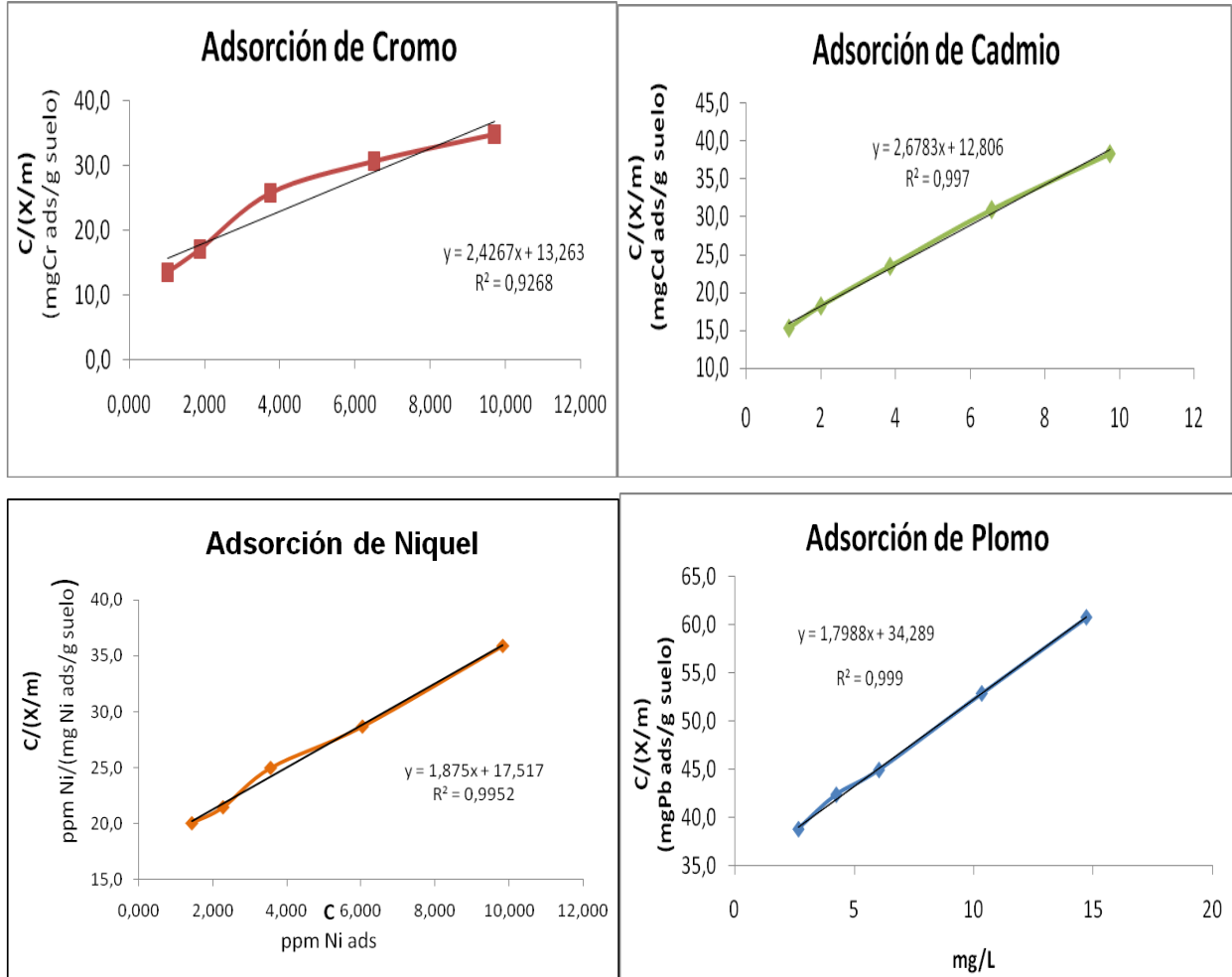


Figura 1. isotermas de adsorción de Cromo, cadmio, níquel y plomo en suelo sin aplicación de biosólido.

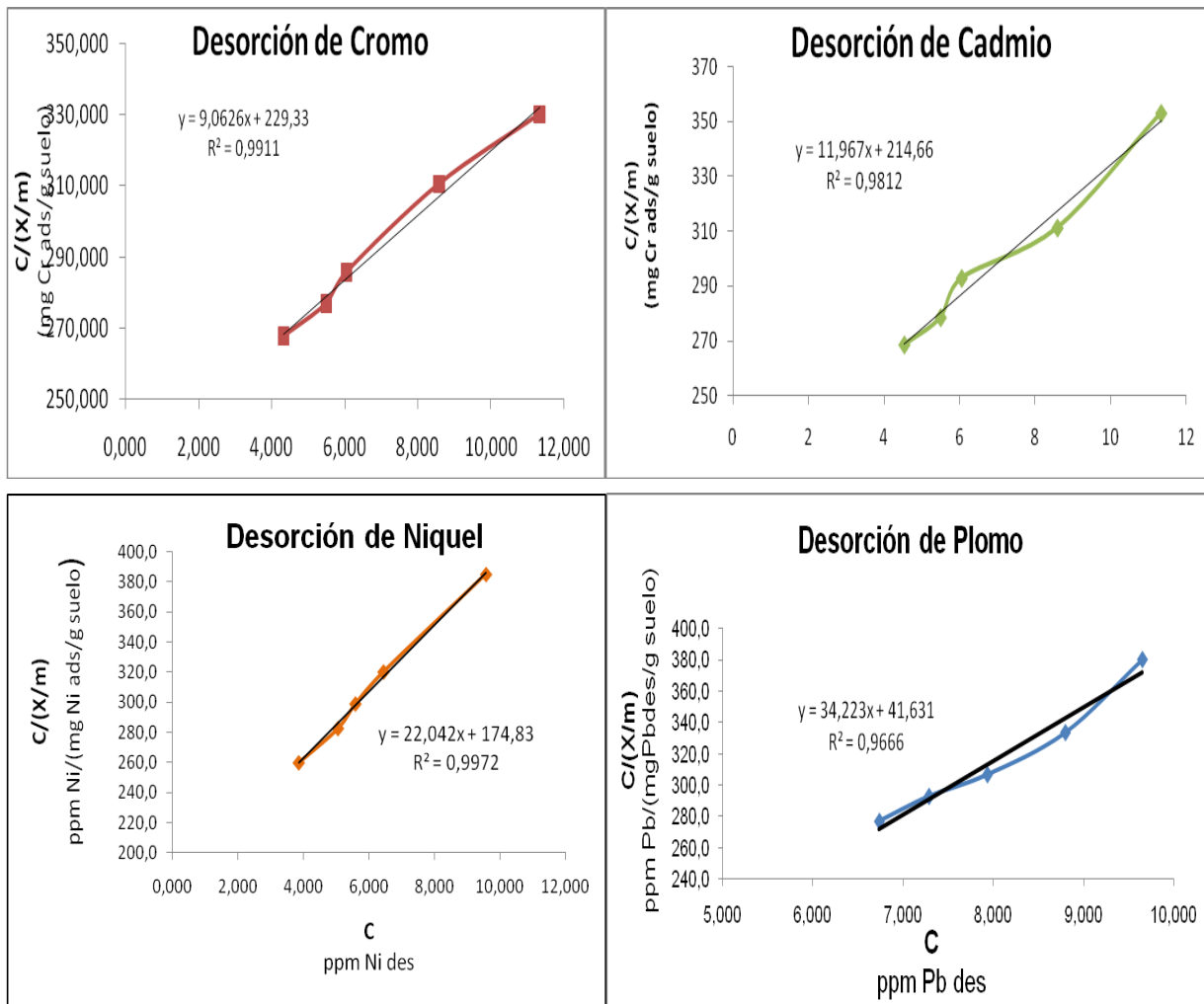


Figura 2. isotermas desorcion de Cromo, Cadmio, Niquel y Plomo en suelo sin aplicacion de biosolido.

Efecto de la aplicación de Biosólido sobre los fenómenos de Sorción del suelo

Tabla 10. Variables mediadas a partir de las isotermas de Adsorción- Desorción. (3 replicas)

| Cromo | | | | |
|------------------------|------------------|----------|------------------|----------|
| Sustrato | Adsorción | | Desorción | |
| | K | B | K | B |
| Suelos | 0,183 | 0,412 | 0,039 | 0,110 |
| | 0,183 | 0,412 | 0,039 | 0,110 |
| | 0,183 | 0,412 | 0,039 | 0,110 |
| Biosólidos | 0,140 | 0,447 | 0,038 | 0,103 |
| | 0,140 | 0,447 | 0,038 | 0,103 |
| | 0,140 | 0,447 | 0,038 | 0,103 |
| 1 dosis | 0,112 | 0,474 | 1,699 | 0,004 |
| | 0,112 | 0,474 | 1,699 | 0,004 |
| | 0,112 | 0,475 | 1,699 | 0,004 |
| 2 dosis | 0,106 | 0,482 | 0,375 | 0,019 |
| | 0,106 | 0,482 | 0,376 | 0,019 |
| | 0,106 | 0,482 | 0,376 | 0,0188 |
| 3 dosis | 0,082 | 0,540 | 0,086 | 0,063 |
| | 0,082 | 0,540 | 0,086 | 0,063 |
| | 0,082 | 0,540 | 0,086 | 0,063 |
| Cadmio | | | | |
| Sustrato | Adsorción | | Desorción | |
| | K | b | K | b |
| Suelos | 0,209 | 0,373 | 0,056 | 0,084 |
| | 0,209 | 0,373 | 0,056 | 0,083 |
| | 0,209 | 0,373 | 0,056 | 0,083 |
| Biosólidos | 0,065 | 0,676 | 0,033 | 0,116 |
| | 0,065 | 0,676 | 0,033 | 0,116 |
| | 0,065 | 0,676 | 0,033 | 0,116 |
| 1 dosis (3 ton/hra) | 0,093 | 0,504 | 0,442 | 0,011 |
| | 0,095 | 0,498 | 0,442 | 0,011 |
| | 0,096 | 0,495 | 0,441 | 0,011 |
| 2 dosis (6 ton/hra) | 0,083 | 0,542 | 0,076 | 0,054 |
| | 0,083 | 0,542 | 0,076 | 0,054 |
| | 0,083 | 0,542 | 0,076 | 0,054 |
| 3 dosis (9 ton/hra) | 0,053 | 0,635 | 0,061 | 0,061 |
| | 0,053 | 0,636 | 0,061 | 0,061 |
| | 0,053 | 0,635 | 0,061 | 0,061 |

| Níquel | | | | |
|------------------------|------------------|----------|------------------|----------|
| Sustrato | Adsorción | | Desorción | |
| | K | b | K | b |
| Suelos | 0,107 | 0,533 | 0,126 | 0,045 |
| | 0,107 | 0,533 | 0,126 | 0,045 |
| | 0,107 | 0,533 | 0,126 | 0,045 |
| Biosólidos | 0,041 | 0,488 | 0,317 | 0,018 |
| | 0,041 | 0,489 | 0,317 | 0,018 |
| | 0,041 | 0,488 | 0,317 | 0,018 |
| 1 dosis (3 ton/hra) | 0,104 | 0,536 | 0,114 | 0,042 |
| | 0,104 | 0,536 | 0,114 | 0,042 |
| | 0,104 | 0,536 | 0,114 | 0,042 |
| 2 dosis (6 ton/hra) | 0,101 | 0,533 | 0,074 | 0,051 |
| | 0,101 | 0,533 | 0,074 | 0,051 |
| | 0,101 | 0,533 | 0,074 | 0,051 |
| 3 dosis (9 ton/hra) | 0,087 | 0,567 | 0,069 | 0,054 |
| | 0,087 | 0,567 | 0,069 | 0,054 |
| | 0,087 | 0,567 | 0,069 | 0,053 |

| Plomo | | | | |
|------------------------|------------------|----------|------------------|----------|
| Sustrato | Adsorción | | Desorción | |
| | K | B | K | b |
| Suelo | 0,068 | 0,588 | 0,857 | 0,024 |
| | 0,067 | 0,588 | 0,857 | 0,024 |
| | 0,067 | 0,588 | 0,856 | 0,024 |
| Biosólidos | 0,044 | 0,903 | 0,251 | 0,039 |
| | 0,044 | 0,903 | 0,251 | 0,039 |
| | 0,044 | 0,903 | 0,251 | 0,039 |
| 1 dosis (3 ton/hra) | 0,064 | 0,607 | 0,822 | 0,029 |
| | 0,064 | 0,607 | 0,822 | 0,029 |
| | 0,064 | 0,607 | 0,822 | 0,029 |
| 2 dosis (6 ton/hra) | 0,057 | 0,630 | 0,091 | 0,040 |
| | 0,057 | 0,630 | 0,091 | 0,040 |
| | 0,057 | 0,629 | 0,091 | 0,040 |
| 3 dosis (9 ton/hra) | 0,052 | 0,556 | 0,052 | 0,053 |
| | 0,052 | 0,556 | 0,052 | 0,053 |
| | 0,052 | 0,556 | 0,052 | 0,053 |

Tabla 11. Isotherma de Langmuir, para la adsorción de Cr, Ni, Cd, Pb.

| Tratamiento | Cromo | | Niquel | | Cadmio | | Plomo | |
|----------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | C | C/x/m | C | C/x/m | C | C/x/m | C | C/x/m |
| Suelo | 4,321 | 267,762 | 1,438 | 2,026 | 1,150 | 15,334 | 1,911 | 26,806 |
| | 5,494 | 276,957 | 2,279 | 21,449 | 2,004 | 18,255 | 3,422 | 32,401 |
| | 6,052 | 285,780 | 3,562 | 24,965 | 3,855 | 23,509 | 4,771 | 34,506 |
| | 8,590 | 310,537 | 6,040 | 28,668 | 6,573 | 31,001 | 7,988 | 38,572 |
| | 11,340 | 330,034 | 9,823 | 35,871 | 9,736 | 38,381 | 12,438 | 46,162 |
| 3 Ton Bios/ Ha Suelo | 1,48 | 20,094 | 1,542 | 21,006 | 1,75 | 24,611 | 2,039 | 28,498 |
| | 2,74 | 25,705 | 2,414 | 22,149 | 2,95 | 27,652 | 3,283 | 31,471 |
| | 4,08 | 28,474 | 3,603 | 24,915 | 4,34 | 30,630 | 4,705 | 33,541 |
| | 7,33 | 35,300 | 6,448 | 30,231 | 7,12 | 34,138 | 7,926 | 38,319 |
| | 11,35 | 41,930 | 9,305 | 35,232 | 12,29 | 46,234 | 9,957 | 42,096 |
| 6 Ton Bios/ Ha Suelo | 1,65 | 22,994 | 1,523 | 20,784 | 1,75 | 24,661 | 2,07 | 30,378 |
| | 2,63 | 24,610 | 2,598 | 23,910 | 2,95 | 27,987 | 3,49 | 33,468 |
| | 3,96 | 28,177 | 3,686 | 25,610 | 4,34 | 31,137 | 5,05 | 36,434 |
| | 7,16 | 34,481 | 6,699 | 31,689 | 7,12 | 35,745 | 8,42 | 41,257 |
| | 11,35 | 42,984 | 9,967 | 36,879 | 11,20 | 42,584 | 12,13 | 46,690 |
| 9 Ton Bios/ Ha Suelo | 1,81 | 25,578 | 1,649 | 22,788 | 2,23 | 32,394 | 2,646 | 38,790 |
| | 2,98 | 28,286 | 2,724 | 25,724 | 3,67 | 35,773 | 4,231 | 42,359 |
| | 4,49 | 30,730 | 3,895 | 27,264 | 5,55 | 38,410 | 6,024 | 44,932 |
| | 7,51 | 36,335 | 6,741 | 32,357 | 8,81 | 43,685 | 10,336 | 52,875 |
| | 11,75 | 44,210 | 9,967 | 37,838 | 12,33 | 48,600 | 14,725 | 60,773 |

Tabla 12. Isotherma de Langmuir, para la desorción de Cr, Ni, Cd, Pb.

| Tratamiento | Cromo | | Niquel | | Cadmio | | Plomo | |
|----------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|
| | C | C/x/m | C | C/x/m | C | C/x/m | C | C/x/m |
| Suelo | 4,321 | 267,762 | 3,854 | 259,973 | 4,531 | 268,577 | 5,678 | 282,890 |
| | 5,494 | 276,957 | 5,053 | 282,748 | 5,494 | 278,500 | 6,078 | 304,913 |
| | 6,052 | 285,780 | 5,588 | 299,053 | 6,052 | 292,852 | 6,589 | 321,392 |
| | 8,590 | 310,537 | 6,447 | 320,265 | 8,590 | 311,223 | 7,872 | 347,143 |
| | 11,340 | 330,034 | 9,585 | 385,006 | 11,340 | 353,085 | 9,422 | 447,984 |
| 3 Ton Bios/ Ha Suelo | 0,506 | 251,821 | 3,463 | 294,715 | 0,506 | 257,410 | 6,744 | 276,886 |
| | 0,527 | 257,282 | 4,415 | 312,494 | 0,527 | 259,508 | 7,442 | 293,176 |
| | 0,532 | 260,670 | 6,170 | 365,850 | 0,688 | 274,206 | 7,934 | 306,030 |
| | 0,552 | 265,396 | 7,638 | 391,664 | 0,859 | 289,168 | 8,783 | 326,540 |
| | 0,664 | 289,277 | 7,878 | 398,574 | 0,915 | 296,369 | 9,612 | 378,516 |
| 6 Ton Bios/ Ha Suelo | 2,513 | 257,131 | 1,523 | 20,784 | 3,187 | 300,227 | 2,280 | 328,949 |
| | 2,743 | 310,752 | 2,598 | 23,910 | 3,307 | 306,715 | 3,736 | 355,627 |
| | 3,620 | 323,682 | 3,686 | 25,610 | 3,752 | 321,901 | 3,812 | 382,555 |
| | 5,038 | 423,056 | 6,699 | 31,689 | 6,647 | 373,924 | 5,651 | 418,064 |
| | 5,961 | 450,423 | 9,967 | 36,879 | 7,689 | 385,393 | 7,605 | 461,817 |
| 9 Ton Bios/ Ha Suelo | 5,500 | 270,867 | 1,649 | 22,788 | 3,283 | 318,815 | 2,280 | 383,901 |
| | 5,881 | 276,575 | 2,724 | 25,724 | 3,386 | 324,230 | 2,969 | 425,535 |
| | 6,627 | 292,470 | 3,895 | 27,264 | 3,778 | 330,925 | 3,812 | 452,518 |
| | 9,775 | 337,593 | 6,741 | 32,357 | 7,604 | 390,561 | 6,034 | 461,893 |
| | 10,026 | 344,458 | 9,967 | 37,838 | 8,117 | 401,424 | 7,222 | 496,950 |

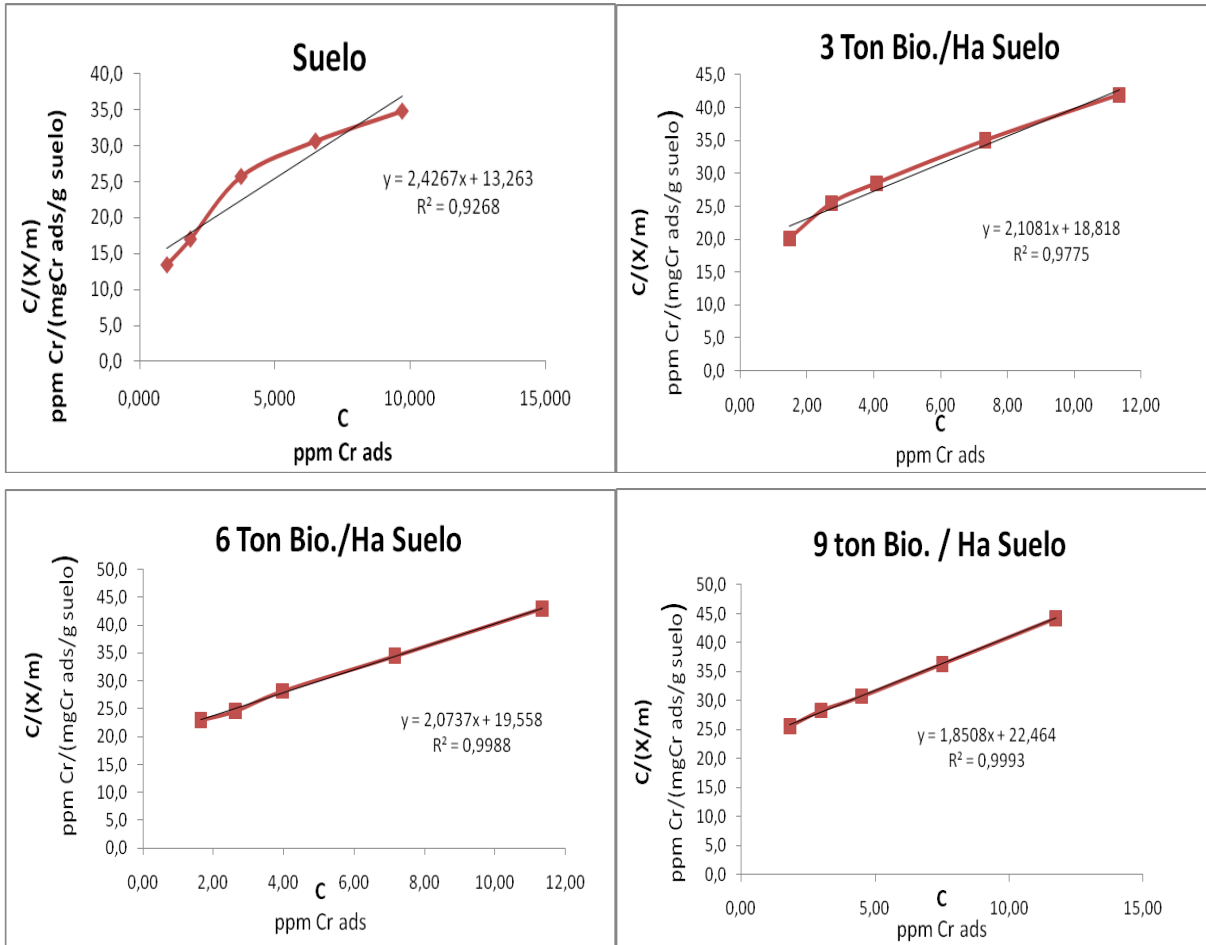


Figura 3. Isotermas de Adsorción de Cromo

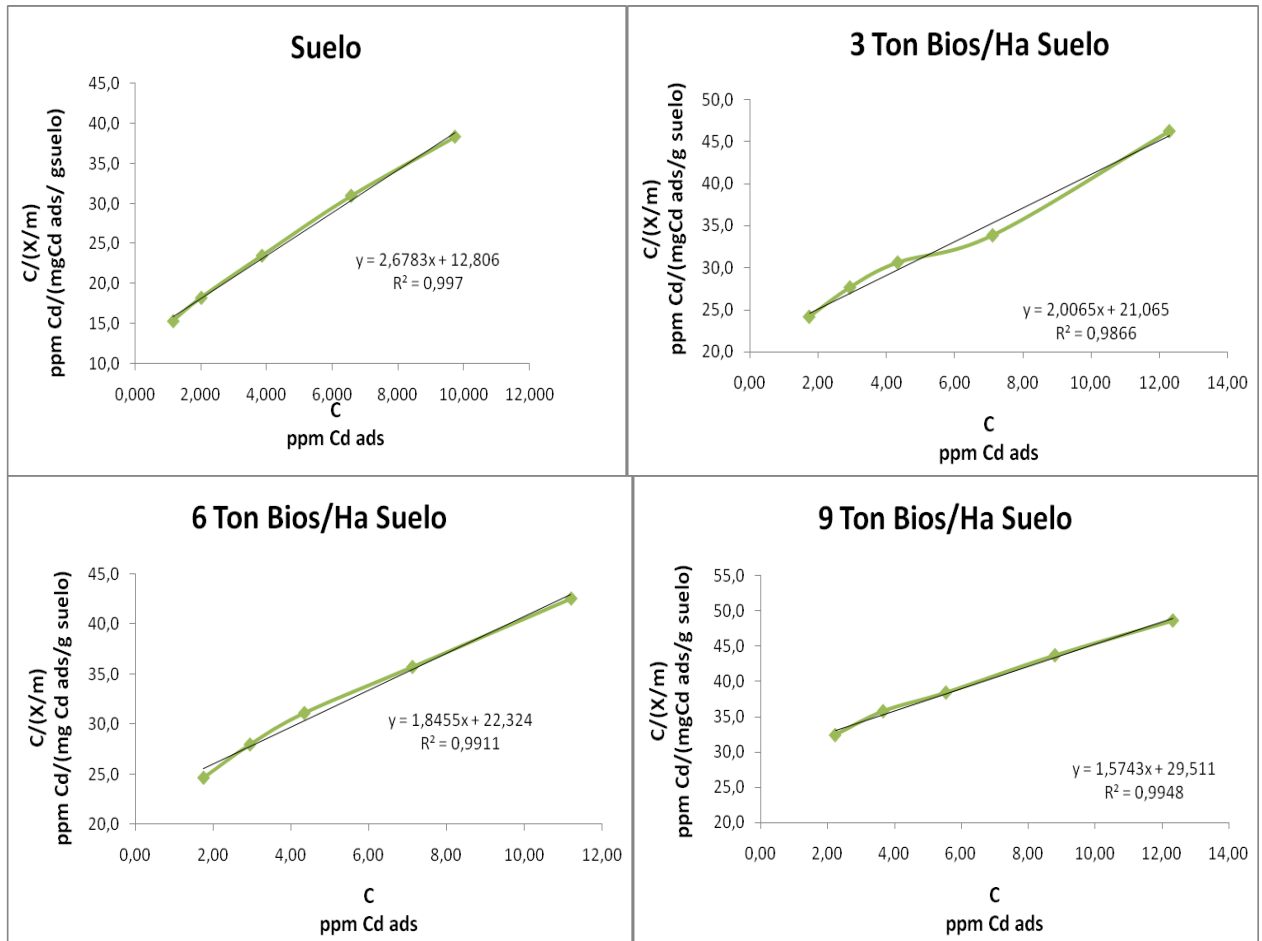


Figura 4. Isothermas de adsorción de Cadmio

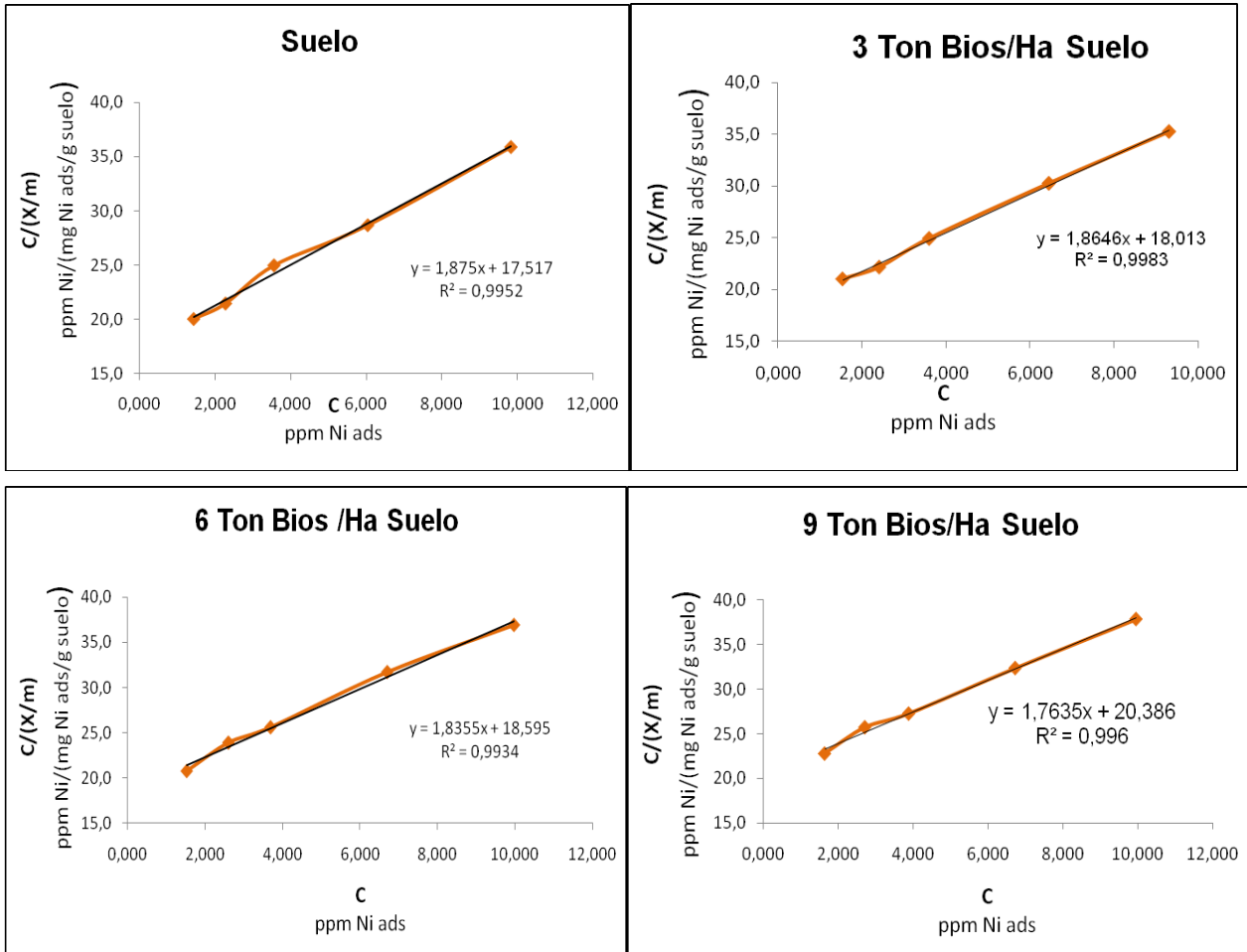
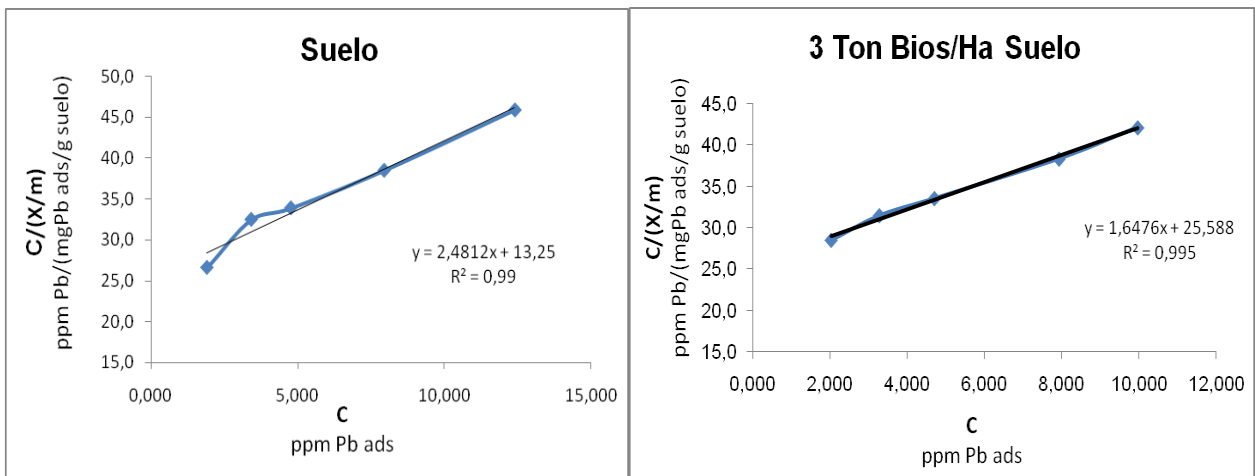


Figura 5. Isothermas de adsorción de Níquel



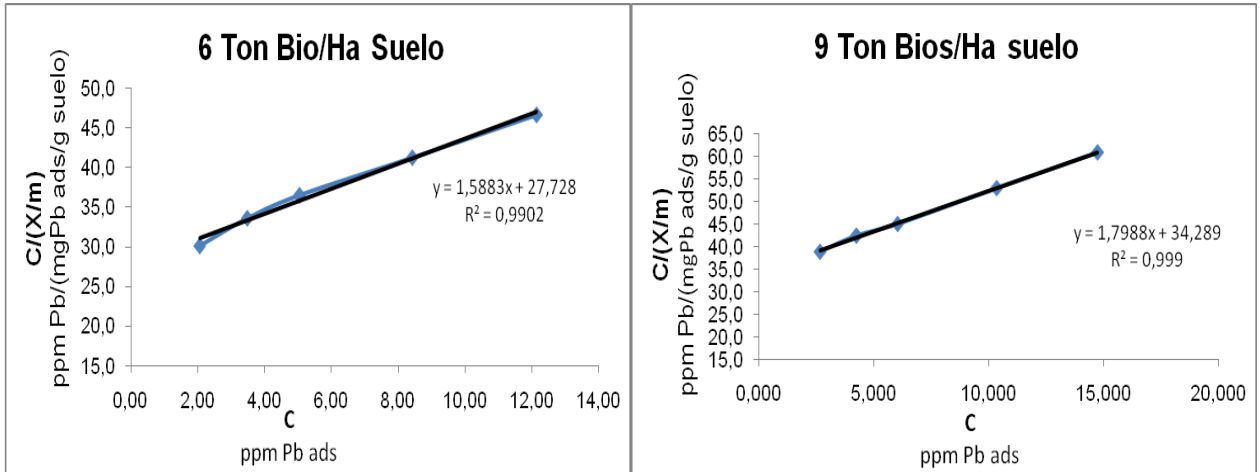


Figura 6. Isothermas de adsorción de Plomo

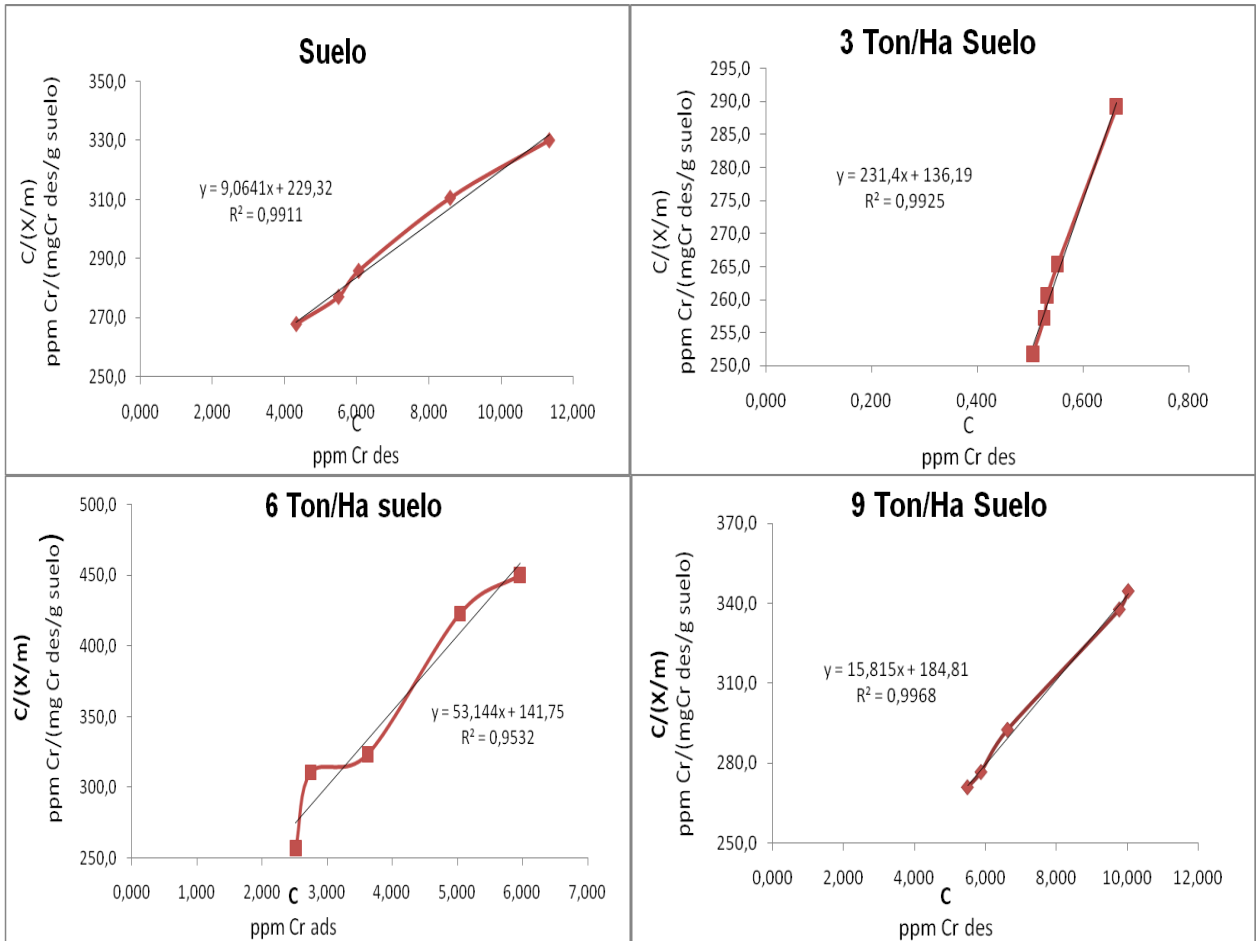


Figura 7. Isothermas de Desorción de Cromo

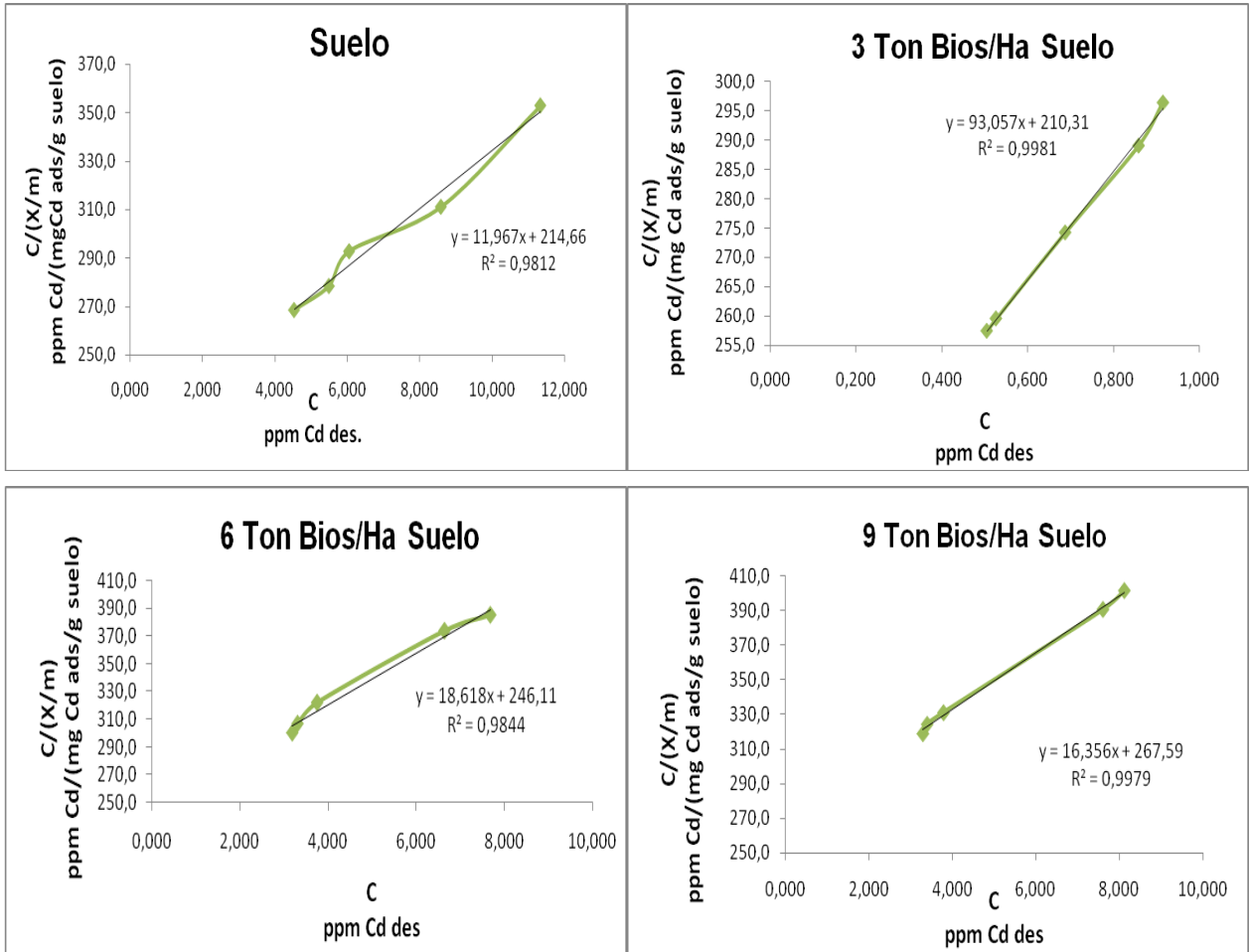
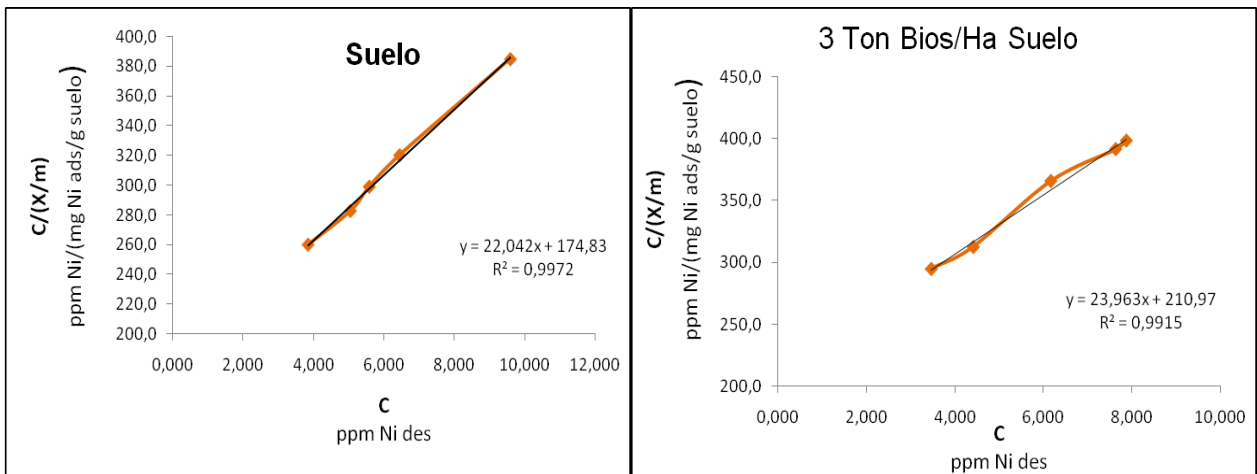


Figura 8. Isotermas de Desorción de Cadmio



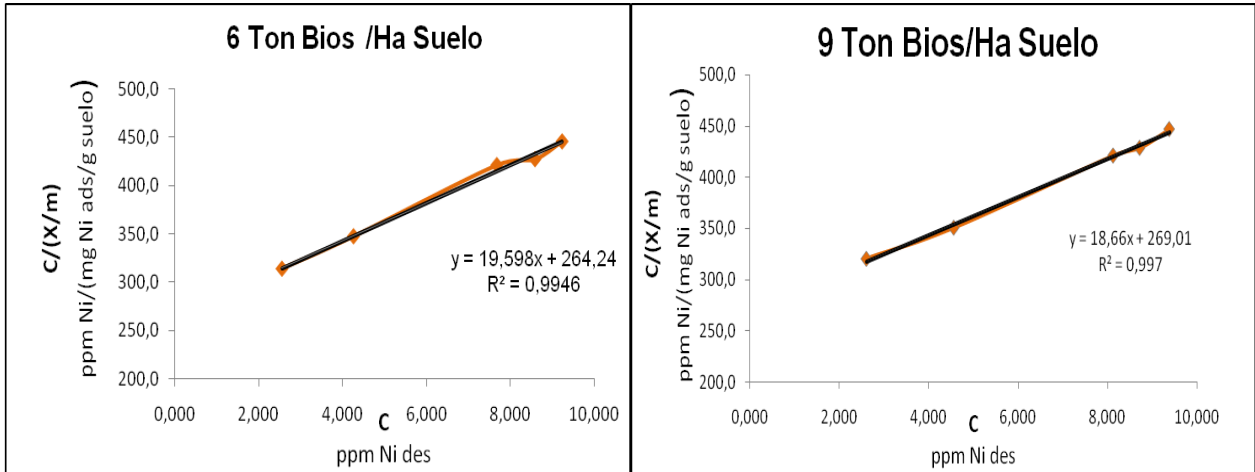


Figura 9. Isotermas de Desorción de Níquel

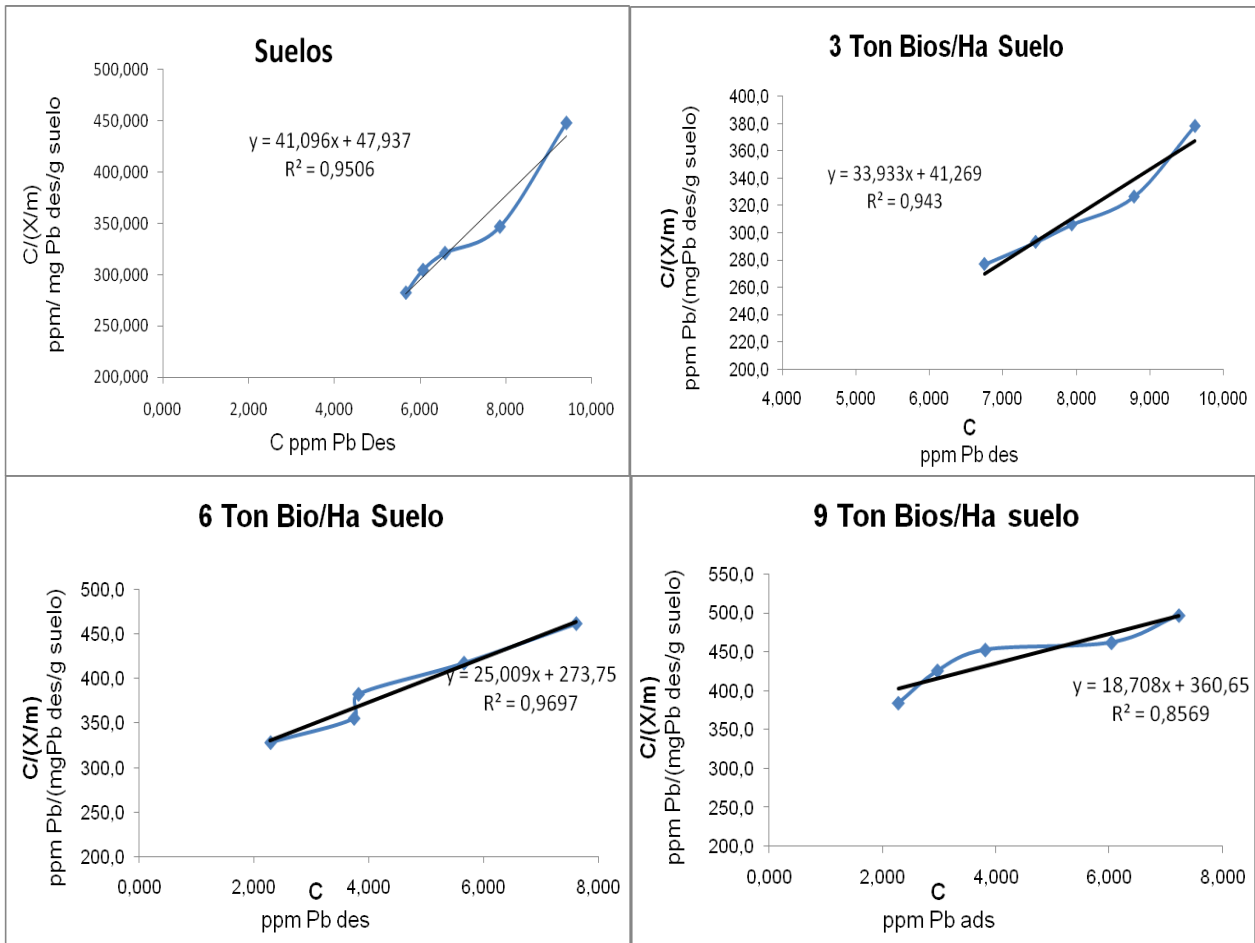


Figura 10. Isotermas de Desorción de Plomo.

Tabla 13. Análisis Estadístico Isotermas de adsorción- desorción de cromo, cadmio, plomo y níquel.

| Cromo | | | | | |
|--------------|-----------|---------------|----------------|----------------|------------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| Tipo K | 1 | 0.78231 | 0.78231 | 13724667 | 2.2e-16*** |
| Tipo | 4 | 297.586 | 0.74397 | 13052025 | 2.2e-16*** |
| Tipo K: Tipo | 4 | 315.225 | 0.78806 | 13825662 | 2.2e-16*** |
| Residuales | 20 | 1.14e-06 | 5.70e-08 | | |
| --- | | | | | |

Tukey comparación múltiple de medianas 95%

| Tipo K | diff | lwr | upr | p adj |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|--------------|
| desorción-Adsorcion | 0,033 | 0,032 | 0,033 | 0,000 |
| Tipo K | diff | lwr | upr | p adj |
| Dosis 3-Dosis 1 | -0,211 | -0,212 | -0,210 | 0,000 |
| suelo-Dosis 1 | -0,136 | -0,137 | -0,135 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 2 | -0,022 | -0,023 | -0,021 | 0,000 |
| suelo-Dosis 2 | 0,053 | 0,052 | 0,054 | 0,000 |
| suelo-Dosis 3 | 0,075 | 0,075 | 0,076 | 0,000 |
| Tipo K: Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
| Desorción:Dosis 1-Adsorción:Dosis 1 | 0,347 | 0,345 | 0,348 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,012 | -0,014 | -0,011 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,019 | -0,020 | -0,017 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,041 | -0,043 | -0,040 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,034 | -0,035 | -0,032 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 1 | 0,114 | 0,113 | 0,116 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 1 | -0,039 | -0,040 | -0,037 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,359 | -0,361 | -0,357 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,366 | -0,367 | -0,364 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,388 | -0,390 | -0,387 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,381 | -0,382 | -0,379 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 1 | -0,233 | -0,234 | -0,231 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 1 | -0,386 | -0,387 | -0,384 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 2-Adsorción:Dosis 2 | -0,007 | -0,008 | -0,005 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,029 | -0,031 | -0,028 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,022 | -0,023 | -0,020 | 0,000 |
| Adsorción: suelo- Adsorción: Dosis 2 | 0,127 | 0,125 | 0,128 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 2 | -0,027 | -0,028 | -0,025 | 0,000 |

| | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Adsorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,023 | -0,024 | -0,021 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,015 | -0,017 | -0,013 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Desorción: Dosis 2 | 0,133 | 0,132 | 0,135 | 0,000 |
| Desorción :suelo -Desorción: Dosis 2 | -0,020 | -0,022 | -0,018 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | 0,008 | 0,006 | 0,009 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,156 | 0,154 | 0,157 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,000 |
| Adsorción :suelo-Desorción: Dosis 3 | 0,148 | 0,147 | 0,150 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 3 | -0,005 | -0,007 | -0,003 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: suelo | -0,153 | -0,155 | -0,152 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | 0,008 | 0,006 | 0,009 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,156 | 0,154 | 0,157 | 0,000 |
| Desorción: suelo- Adsorción: Dosis 3 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Desorción: Dosis 3 | 0,148 | 0,147 | 0,150 | 0,000 |
| Desorción: suelo- Desorción: Dosis 3 | -0,005 | -0,007 | -0,003 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: suelo | -0,153 | -0,155 | -0,152 | 0,000 |

| Cadmio | | | | | |
|---------------|----|----------|----------|---------|---------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| Tipo K | 1 | 0,007967 | 0,007967 | 29546 | < 2,2e-16 *** |
| Tipo | 4 | 0,196441 | 0,04911 | 182115 | < 2,2e-16 *** |
| Tipo K :Tipo | 4 | 0,209442 | 0,052361 | 194168 | < 2,2e-16*** |
| Residuales | 20 | 0,000005 | 2,70E-04 | | |
| --- | | | | | |

| Tipo K | diff | lwr | upr | p adj |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|--------------|
| Desorción-Adsorción | 0,033 | 0,032 | 0,033 | 0,000 |
| Tipo K | diff | lwr | upr | p adj |
| Dosis 3-Dosis 1 | -0,211 | -0,212 | -0,210 | 0,000 |
| suelo-Dosis 1 | -0,136 | -0,137 | -0,135 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 2 | -0,022 | -0,023 | -0,021 | 0,000 |
| suelo-Dosis 2 | 0,053 | 0,052 | 0,054 | 0,000 |
| suelo-Dosis 3 | 0,075 | 0,075 | 0,076 | 0,000 |
| Tipo K :Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
| Desorción: Dosis 1-Adsorción:Dosis 1 | 0,347 | 0,345 | 0,348 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,012 | -0,014 | -0,011 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,019 | -0,020 | -0,017 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,041 | -0,043 | -0,040 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,034 | -0,035 | -0,032 | 0,000 |

| | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 1 | 0,114 | 0,113 | 0,116 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 1 | -0,039 | -0,040 | -0,037 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,359 | -0,361 | -0,357 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,366 | -0,367 | -0,364 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,388 | -0,390 | -0,387 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,381 | -0,382 | -0,379 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 1 | -0,233 | -0,234 | -0,231 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Desorción:Dosis 1 | -0,386 | -0,387 | -0,384 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 2-Adsorción:Dosis 2 | -0,007 | -0,008 | -0,005 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,029 | -0,031 | -0,028 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,022 | -0,023 | -0,020 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 2 | 0,127 | 0,125 | 0,128 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 2 | -0,027 | -0,028 | -0,025 | 0,000 |
| Adsorción:Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,023 | -0,024 | -0,021 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,015 | -0,017 | -0,013 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 2 | 0,133 | 0,132 | 0,135 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Desorción:Dosis 2 | -0,020 | -0,022 | -0,018 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | 0,008 | 0,006 | 0,009 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,156 | 0,154 | 0,157 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 3 | 0,148 | 0,147 | 0,150 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Desorción:Dosis 3 | -0,005 | -0,007 | -0,003 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:suelo | -0,153 | -0,155 | -0,152 | 0,000 |
| Desorción:Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | 0,008 | 0,006 | 0,009 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,156 | 0,154 | 0,157 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Desorción:Dosis 3 | 0,148 | 0,147 | 0,150 | 0,000 |
| Desorción:suelo-Desorción:Dosis 3 | -0,005 | -0,007 | -0,003 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: suelo | -0,153 | -0,155 | -0,152 | 0,000 |

| Niquel | | | | | |
|--------------|----|----------|----------|---------|-------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| Tipo K | 1 | 0,020 | 0,020 | 2906808 | <2,2e-16*** |
| Tipo | 4 | 0,038 | 0,009 | 1349845 | <2,2e-16*** |
| Tipo K: Tipo | 4 | 0,096 | 0,024 | 3421974 | <2,2e-16*** |
| Residual | 20 | 1,40E-07 | 7,00E-09 | | |
| --- | | | | | |

| Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|
| Desorción -Adsorción | 0,0521 | 0,0520 | 0,0522 | 0,000 |

| | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|-------|
| Dosis 2-Dosis 1 | -0,0214 | -0,0215 | -0,0212 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 1 | -0,0309 | -0,0311 | -0,0308 | 0,000 |
| suelo-Dosis 1 | 0,0077 | 0,0076 | 0,0079 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 2 | -0,0096 | -0,0097 | -0,0094 | 0,000 |
| suelo-Dosis 2 | 0,0291 | 0,0289 | 0,0292 | 0,000 |
| suelo-Dosis 3 | 0,0387 | 0,0385 | 0,0388 | 0,000 |

| Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|--------------|
| Desorción: Dosis 1-Adsorción:Dosis 1 | 0,010 | 0,010 | 0,011 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,003 | -0,003 | -0,002 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 2-Adsorción:Dosis 1 | -0,030 | -0,030 | -0,029 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,017 | -0,017 | -0,017 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 1 | -0,035 | -0,035 | -0,034 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Adsorción: Dosis 1 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: Dosis 1 | 0,022 | 0,022 | 0,023 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,013 | -0,013 | -0,013 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 2-Desorción:Dosis 1 | -0,040 | -0,040 | -0,040 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,027 | -0,028 | -0,027 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,045 | -0,045 | -0,045 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Desorción: Dosis 1 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 1 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 2-Adsorción:Dosis 2 | -0,027 | -0,027 | -0,027 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 2 | -0,032 | -0,032 | -0,032 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Adsorción: Dosis 2 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: Dosis 2 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,000 |
| Adsorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | 0,013 | 0,012 | 0,013 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,005 | -0,005 | -0,005 | 0,000 |
| Adsorción :suelo-Desorción: Dosis 2 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 2 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | -0,018 | -0,018 | -0,017 | 0,000 |
| Adsorción: suelo-Adsorción: Dosis 3 | 0,020 | 0,020 | 0,021 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: Dosis 3 | 0,039 | 0,039 | 0,040 | 0,000 |
| Adsorción:suelo-Adsorción:Dosis 3 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 3 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: suelo | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,000 |

| Plomo | | | | | |
|-------------|----|----------|----------|----------|--------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
| Tipo K | 1 | 0,95765 | 0,95765 | 28729600 | < 2.2e-16*** |
| Tipo | 4 | 0,97594 | 0,24399 | 7319566 | < 2.2e-16*** |
| Tipo K:Tipo | 4 | 0,90753 | 0,22688 | 6806440 | < 2.2e-16*** |
| Residuales | 20 | 6,67E-04 | 3,33E-05 | | |
| --- | | | | | |

| Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Desorcion-Adsorcion | 0,357 | 0,357 | 0,357 | 0,000 |
| Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
| Dosis 2-Dosis 1 | -0,368 | -0,368 | -0,368 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 1 | -0,391 | -0,391 | -0,391 | 0,000 |
| suelo-Dosis 1 | 0,022 | 0,021 | 0,022 | 0,000 |
| Dosis 3-Dosis 2 | -0,023 | -0,023 | -0,023 | 0,000 |
| suelo-Dosis 2 | 0,390 | 0,389 | 0,390 | 0,000 |
| suelo-Dosis 3 | 0,413 | 0,412 | 0,413 | 0,000 |
| Tipo | diff | lwr | upr | p adj |
| Desorción: suelo-Desorción: biosolido | 0,6100 | 0,6095 | 0,6105 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 1-Adsorcion:Dosis 1 | 0,7560 | 0,7555 | 0,7565 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 2-Adsorcion:Dosis 1 | -0,0070 | -0,0075 | -0,0065 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 2-Adsorcion:Dosis 1 | 0,0270 | 0,0265 | 0,0275 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorcion:Dosis 1 | -0,0120 | -0,0125 | -0,0115 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorcion:Dosis 1 | -0,0140 | -0,0145 | -0,0135 | 0,0000 |
| Adsorcion:suelo-Adsorcion:Dosis 1 | 0,0033 | 0,0028 | 0,0039 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: Dosis 1 | 0,7960 | 0,7955 | 0,7965 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 2-Desorcion:Dosis 1 | -0,7630 | -0,7635 | -0,7625 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 2-Desorcion:Dosis 1 | -0,7290 | -0,7295 | -0,7285 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 3-Desorcion:Dosis 1 | -0,7680 | -0,7685 | -0,7675 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 1 | -0,7700 | -0,7705 | -0,7695 | 0,0000 |
| Adsorción: suelo- Desorción: Dosis 1 | -0,7527 | -0,7532 | -0,7521 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 1 | 0,0400 | 0,0395 | 0,0405 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 2-Adsorcion:Dosis 2 | 0,0340 | 0,0335 | 0,0345 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 3-Adsorcion:Dosis 2 | -0,0050 | -0,0055 | -0,0045 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorcion:Dosis 2 | -0,0070 | -0,0075 | -0,0065 | 0,0000 |
| Adsorcion:suelo-Adsorcion:Dosis 2 | 0,0103 | 0,0098 | 0,0109 | 0,0000 |
| Desorción:suelo-Adsorcion:Dosis 2 | 0,8030 | 0,8025 | 0,8035 | 0,0000 |
| Adsorción: Dosis 3-Desorcion:Dosis 2 | -0,0390 | -0,0395 | -0,0385 | 0,0000 |

| | | | | |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Desorción: Dosis 3-Desorción:Dosis 2 | -0,0410 | -0,0415 | -0,0405 | 0,0000 |
| Adsorción: suelo-Desorción: Dosis 2 | -0,0237 | -0,0242 | -0,0231 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 2 | 0,7690 | 0,7685 | 0,7695 | 0,0000 |
| Desorción: Dosis 3-Adsorción:Dosis 3 | -0,0020 | -0,0025 | -0,0015 | 0,0000 |
| Adsorción: suelo-Adsorción: Dosis 3 | 0,0153 | 0,0148 | 0,0159 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: Dosis 3 | 0,8080 | 0,8075 | 0,8085 | 0,0000 |
| Adsorción: suelo-Desorción: Dosis 3 | 0,0173 | 0,0168 | 0,0179 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Desorción: Dosis 3 | 0,8100 | 0,8095 | 0,8105 | 0,0000 |
| Desorción: suelo-Adsorción: suelo | 0,7927 | 0,7921 | 0,7932 | 0,0000 |

Anexo 6. Estudio de la Respiración del Suelo como Indicador de la Degradación del Suelo bajo Aplicación de Biosólido.

Tabla 14. Cinéticas de orden cero, primero y segundo para cada una de las dosis aplicadas de Biosólido.

| 1° Dosis (0 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
|---|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,330 | 0,935 | 0,135 | 0,857 | -0,337 | 0,737 |
| 2 | 0,355 | 0,939 | 0,134 | 0,879 | -0,310 | 0,765 |
| 3 | 0,339 | 0,974 | 0,131 | 0,903 | -0,308 | 0,780 |
| 4 | 0,339 | 0,974 | 0,131 | 0,903 | -0,308 | 0,780 |
| 5 | 0,328 | 0,971 | 0,126 | 0,908 | -0,289 | 0,784 |
| 6 | 0,341 | 0,965 | 0,137 | 0,865 | -0,339 | 0,731 |
| 2° Dosis (3 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,229 | 0,993 | 0,070 | 0,983 | -0,117 | 0,961 |
| 2 | 0,229 | 0,991 | 0,070 | 0,980 | -0,118 | 0,958 |
| 3 | 0,233 | 0,993 | 0,072 | 0,980 | -0,121 | 0,953 |
| 4 | 0,229 | 0,995 | 0,071 | 0,979 | -0,120 | 0,949 |
| 5 | 0,228 | 0,991 | 0,071 | 0,973 | -0,120 | 1,942 |
| 6 | 0,227 | 0,992 | 0,070 | 0,972 | -0,118 | 0,937 |
| 3° Dosis (5 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,374 | 0,992 | 0,064 | 0,987 | -0,060 | 0,972 |
| 2 | 0,374 | 0,997 | 0,064 | 0,987 | -0,060 | 0,966 |
| 3 | 0,376 | 0,992 | 0,064 | 0,983 | -0,060 | 0,964 |
| 4 | 0,372 | 0,995 | 0,063 | 0,992 | -0,059 | 0,979 |
| 5 | 0,372 | 0,992 | 0,065 | 0,977 | 0,061 | 0,951 |
| 6 | 0,361 | 0,997 | 0,063 | 0,982 | 0,060 | 0,952 |
| 4° Dosis (7 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,376 | 0,972 | 0,060 | 0,965 | -0,052 | 0,954 |
| 2 | 0,396 | 0,972 | 0,064 | 0,968 | -0,055 | 0,959 |
| 3 | 0,356 | 0,972 | 0,058 | 0,967 | -0,050 | 0,958 |
| 4 | 0,394 | 0,972 | 0,064 | 0,967 | 0,056 | 0,956 |
| 5 | 0,387 | 0,972 | 0,063 | 0,967 | -0,055 | 0,956 |
| 6 | 0,387 | 0,974 | 0,062 | 0,970 | -0,054 | 0,960 |

| 5° Dosis (10 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,354 | 0,993 | 0,053 | 0,977 | -0,043 | 0,975 |
| 2 | 0,367 | 0,992 | 0,020 | 0,960 | -0,087 | 0,809 |
| 3 | 0,359 | 0,998 | 0,054 | 0,993 | -0,044 | 0,979 |
| 4 | 0,350 | 0,996 | 0,053 | 0,992 | -0,043 | 0,979 |
| 5 | 0,354 | 0,997 | 0,054 | 0,991 | -0,043 | 0,976 |
| 6 | 0,354 | 0,992 | 0,054 | 0,984 | -0,044 | 0,970 |

| 6° Dosis (12 ton bios/100g suelo) | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Ensayo N° | Orden 0 | | 1° Orden | | 2° Orden | |
| | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 | Pendiente | R2 |
| 1 | 0,352 | 0,998 | 0,045 | 0,991 | -0,030 | 0,976 |
| 2 | 0,361 | 0,997 | 0,046 | 0,996 | -0,031 | 0,985 |
| 3 | 0,315 | 0,990 | 0,039 | 0,991 | -0,026 | 0,988 |
| 4 | 0,370 | 0,993 | 0,047 | 0,989 | -0,032 | 0,980 |
| 5 | 0,354 | 0,999 | 0,045 | 0,993 | -0,030 | 0,979 |
| 6 | 0,372 | 0,997 | 0,047 | 0,988 | -0,032 | 0,969 |

Tabla 15. Parámetros de las Cinéticas de orden cero, para cada dosis de biosólido aplicada.

| Ensayo N° | 1° Dosis (0 Ton Biosólido/100g suelo) | | 2° Dosis (3 Ton Biosólido/100g suelo) | | 3° Dosis (5 Ton Biosólido/100g suelo) | |
|-----------|--|------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
| | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 |
| 1 | 0,330 | 0,268 | 0,229 | 0,779 | 0,374 | 1,470 |
| 2 | 0,355 | 0,264 | 0,229 | 0,774 | 0,374 | 1,470 |
| 3 | 0,339 | 0,264 | 0,233 | 0,760 | 0,376 | 1,476 |
| 4 | 0,339 | 0,264 | 0,229 | 0,770 | 0,372 | 1,481 |
| 5 | 0,328 | 0,297 | 0,228 | 0,774 | 0,372 | 1,472 |
| 6 | 0,341 | 0,262 | 0,227 | 0,785 | 0,361 | 1,474 |

| Ensayo N° | 4° Dosis (7Ton Biosólido/100g suelo) | | 5° Dosis (10 Ton Biosólido/100g Suelo) | | 6° Dosis (12 Ton Biosólido/100g suelo) | |
|-----------|---|------------------------|---|------------------------|---|------------------------|
| | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 | Pendiente (K) | mg CO ₂ t=0 |
| 1 | 0,376 | 1,635 | 0,354 | 1,868 | 0,352 | 2,420 |
| 2 | 0,396 | 1,566 | 0,367 | 1,863 | 0,361 | 2,389 |
| 3 | 0,356 | 1,646 | 0,359 | 1,850 | 0,315 | 2,585 |
| 4 | 0,394 | 1,538 | 0,350 | 1,854 | 0,370 | 2,376 |
| 5 | 0,387 | 1,571 | 0,354 | 1,859 | 0,354 | 2,435 |
| 6 | 0,387 | 1,58 | 0,354 | 1,859 | 0,372 | 2,369 |

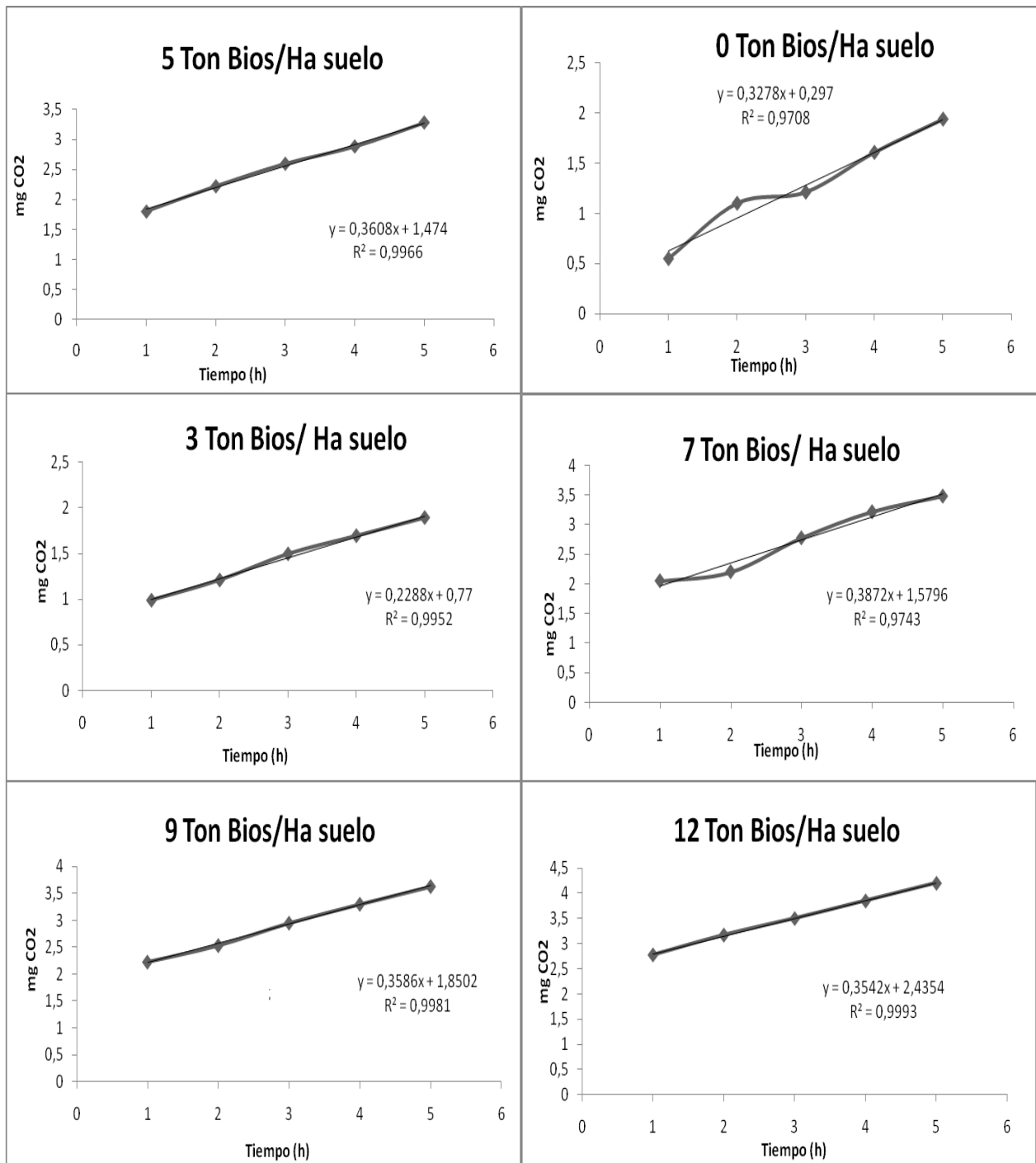


Figura 11. Cinética de orden cero en cada una de las dosis de Biosólido aplicada.

Tabla 16. Análisis Estadístico de actividad Respirométrica

| Factor | | | | Valor | | | |
|--------------------------|----|----|--------|----------|--------|--------|--------|
| Múltiple R | | | | 0,9769 | | | |
| Múltiple R ² | | | | 0,9543 | | | |
| Adjusted R ² | | | | 0,9530 | | | |
| F(1,34) | | | | 710,0744 | | | |
| p | | | | 0,0000 | | | |
| Std.Err. of Estimate | | | | 0,1552 | | | |
| Condiciones estadísticas | 0 | 36 | 1,3990 | 0,7156 | 0,1192 | 1,1569 | 1,6412 |
| | 3 | 6 | 0,2699 | 0,0134 | 0,0054 | 0,2557 | 0,2840 |
| | 5 | 6 | 0,7736 | 0,0084 | 0,0034 | 0,7647 | 0,7825 |
| | 7 | 6 | 1,4738 | 0,0042 | 0,0017 | 1,4694 | 1,4782 |
| | 10 | 6 | 1,5893 | 0,0421 | 0,0172 | 1,5450 | 1,6336 |
| | 12 | 6 | 1,8588 | 0,0063 | 0,0026 | 1,8521 | 1,8655 |
| | | 6 | 2,4290 | 0,0805 | 0,0328 | 2,3444 | 2,5135 |