

MANEJO DE LODOS PRODUCIDOS POR EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR PARTE DE LOS PROYECTOS ADSCRITOS AL SECTOR MINERO COMO MEDIDA DE COMPENSACIÓN Y RECUPERACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR ESTA ACTIVIDAD

MANAGEMENT OF SLUDGE PRODUCED BY THE TREATMENT OF WASTEWATER BY THE ATTACHED TO MINING PROJECTS AS A MEASURE OF COMPENSATION AND RECOVERY OF SOILS AFFECTED BY THIS ACTIVITY

Autor: Camilo Andres Perdomo Reina

Tutor: Erika Johana Ruiz Suárez

Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales

Facultad de Ingeniería

Universidad Militar Nueva Granada

Bogotá D.C., Colombia

2015



RESUMEN

De los proyectos ambientales sujetos a licenciamiento ambiental, se considera al sector minero como uno de los que más afectación tiene sobre los componentes social, biótico y abiótico. Implícito en este último componente se encuentra el suelo, del cual no se tiene un marco claro de compensación y recuperación, teniendo presente que la institución ambiental en Colombia es relativamente joven, y considerando que algunos de los instrumentos y herramientas para el seguimiento y control de los proyectos ambientales aún se encuentran en formación, en el presente artículo se plantea un punto de partida en cuanto a recuperación del suelo se refiere, lo anterior de acuerdo a la ausencia de un marco claro en cuanto a su uso y manejo, exceptuando la gestión del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS con el proyecto de la POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL AMBIENTAL DEL SUELO (GIAS). Por lo tanto y de acuerdo a lo anteriormente expuesto, el uso de los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales llevados a cabo en las PTAR's de cada empresa minera podría articularse al Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad de acuerdo a la metodología allí expuesta, y así determinar las áreas en las que se puede disponer este lodo y el factor de compensación aplicable de manera que se inicie la recuperación del suelo.

Palabras Clave: licencia ambiental, sector minero, suelo, recuperación, lodos, manual, PTAR's, compensación, Ma.F.E, GIAS, Biosólidos.

ABSTRACT

From The environmental projects subject to environmental licensing, the mining sector it's considered as one of the most hazardous has on social, biotic and abiotic components. Implicit in this last component is the ground, which don't have a clear framework for compensation and recovery, bearing in mind that environmental institution in Colombia is relatively young, and considering that some of the instruments and tools for monitoring and control environmental projects are still in training, in this article a starting point arises as to reclamation is concerned, the above according to the absence of a clear framework regarding their use and management, exception management the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development - MADS the project NATIONAL ENVIRONMENTAL POLICY FOR COMPREHENSIVE GROUND MANAGEMENT (GIAS). Therefore, and according to the above, the use of sludge resulting from wastewater treatment conducted in the WWTP's of each mining company could articulate the Manual for the allocation of compensation for loss of biodiversity according to the methodology exposed there, and determine the areas where this sludge can be disposed and apply compensation factor so that soil remediation begins.

Keywords: environmental license, mining sector, soil recovery, sludge, manual, WWTP's, compensation, Ma.FE, GIAS, Biosolids.

INTRODUCCIÓN

En los proyectos ambientales sujetos a licenciamiento ambiental referentes al sector minero, se puede indicar que los subcomponentes ambientales con mayor afectación son el hídrico, el atmosférico y el suelo, este último, sin un marco claro de compensación y recuperación, lo cual ha permitido generar un mayor número de impactos negativos de los habituales y de grandes magnitudes por pérdida del recurso a un costo elevado, dicho costo ha de verse reflejado en la economía del estado, debido a la dependencia en gran porcentaje de los servicios ambientales que brinda el suelo como parte integral de los ecosistemas.

Si bien es cierto que la institucionalidad ambiental en Colombia es quien debe velar por dichos recursos; también es cierto que los instrumentos y herramientas para el seguimiento y control de los proyectos ambientales aún están en etapa de formación, por lo cual es necesario establecer un punto de partida en cuanto a recuperación del suelo se refiere, teniendo en cuenta que no existe un marco claro en cuanto a su uso y manejo, sin embargo, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS se encuentra abocado con la gestión del proyecto de la POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL AMBIENTAL DEL SUELO (GIAS), buscando establecer un marco específico para el manejo de este recurso.

El presente artículo se encuentra enfocado en observar el uso que se le da a los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales llevado a cabo en las PTAR's de cada empresa minera de acuerdo a la actividad desarrollada. Es importante tener en cuenta que este proceso está siendo sub utilizado por diversos factores, entre ellos el financiero.

Autores como Moncayo [1], Oropeza [2] o Aguilar y Botero [3] entre otros, coinciden en afirmar mediante sus tesis que las propiedades de los lodos tratados son significativas debido a los grandes aportes de nutrientes que hacen al suelo, por lo cual se puede determinar que cada Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de cualquier empresa minera con licencia ambiental cuenta con el potencial y la materia prima para hacer de las toneladas de lodo producidas anualmente algo útil y aprovechable, esto sin mencionar las plantas de tratamiento que son manejadas por algunas empresas de servicios públicos. Así mismo este proceso de manejo de lodos puede ser asumido como parte del proceso de compensación por uso y aprovechamiento del suelo, componente ambiental que se le ha restado importancia, a pesar de que representa la mayor cantidad de ingresos económicos a la nación en servicios ambientales.

Por lo tanto, lo que se busca con el presente documento es invitar a las empresas mineras sujetas a licenciamiento ambiental a que asuman el adecuado manejo de estos lodos con el objetivo de incluirlos como medidas de manejo y compensación dentro de sus Planes de Manejo Ambiental para sus proyectos, y así articular estas medidas con la metodología propuesta en el manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y de esta manera buscar contrarrestar los pasivos

ambientales que se pueden llegar a generar por el actual vacío referente al uso y aprovechamiento del suelo por el desarrollo de este tipo de proyectos.

En cuanto al manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad se tiene que en el marco de un Convenio suscrito entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), The Nature Conservancy – TNC, World Wildlife Fund – WWF y Conservación Internacional – CI; bajo la ejecución de The Nature Conservancy – TNC se desarrolló el manual, considerando que el país cuenta con un marco normativo que establece la obligatoriedad de realizar compensaciones por afectación del medio ambiente y su biodiversidad [4].

La determinación y cuantificación de las medidas de compensación se realiza con base en este instrumento de uso obligatorio para los solicitantes de licencia ambiental de competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA-, y en este caso para las demás autoridades ambientales con competencia para otorgar el debido licenciamiento.

En este manual establecen los pasos que deben realizarse para determinar y cuantificar las medidas de compensación por pérdida de biodiversidad, respondiendo tres inquietudes fundamentales: i) cuánto compensar, ii) dónde compensar y iii) cómo compensar, bajo la jerarquía de la mitigación, es decir, que se puedan compensar impactos a la biodiversidad que no puedan ser evitados, mitigados o corregidos.

Este manual se desarrolló bajo los lineamientos de la Política para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos - PNGIBSE, la cual en el eje estratégico III – “Desarrollo económico, competitividad y calidad de vida basada en la biodiversidad”, establece como estrategias prioritarias la “Identificación y evaluación de los costos y beneficios económicos, ecológicos, culturales y sociales a largo plazo, derivados de la relación entre actividades productivas y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos derivados de la biodiversidad (compensaciones o –trade offs-); y “Fortalecer las actividades e institucionalidad relacionada con la evaluación de los impactos ambientales y con la asignación de compensaciones ambientales por pérdida de biodiversidad ligadas a proyectos sujetos de licencia ambiental a escala nacional, regional y local para el mantenimiento de la Resiliencia de los sistemas socioecológicos y el suministro de los servicios ecosistémicos fundamentales para la calidad de vida”.

Por último, se espera que la implementación de esta estrategia contribuya a la creación y consolidación de áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SINAP, a la restauración ecológica de áreas priorizadas y a evitar la deforestación en áreas de alto valor ambiental.

Por lo tanto, en el presente artículo se abordará la afectación a los suelos y la ejecución de medidas de compensación ambiental para las empresas del sector

minero a partir del manejo de lodos resultantes de la actividad para su recuperación bajo el marco del manual.

1 COMPENSACIÓN DEL SUELO AFECTADO POR ACTIVIDADES DEL SECTOR MINERO

Para abordar la propuesta sugerida por el presente artículo es necesario realizar una revisión del estado del arte en cuanto a recuperación de suelos por tratamiento de lodos se refiere, por lo cual se tomaran casos internacionales y las respectivas técnicas de recuperación, así mismo se realiza una evaluación de las iniciativas que se han dado en Colombia y el marco normativo en el que se han desarrollado.

En un segundo momento se expondrá la metodología que se emplea en el Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad y de qué manera se logra integrar el cómo compensar, cuánto compensar y dónde compensar con el apoyo de la herramienta Ma.F.E., para el caso concreto de la recuperación de suelos es necesario adaptar esta herramienta con la identificación de suelos afectados en el país.

Finalmente se hará un análisis de las ventajas y desventajas de la implementación de una herramienta de este tipo para la compensación de suelos por la actividad del sector minero, y lo que podría aportar al marco legal ambiental colombiano.

2 MARCO TEÓRICO

Al abordar el componente suelo desde esta perspectiva, es necesario hacer un reconocimiento de las principales funciones del suelo, tales como la de “productor de materias primas, alimentos y fibras” la de “sistema físico de soporte a las principales actividades humanas” o la de “mantener la calidad ambiental, como protector de los demás sistemas con mayor sensibilidad y de menor capacidad de amortiguamiento frente a las intervenciones y alteraciones ambientales”. Así mismo, el suelo presenta capacidades para filtrar, retener y transformar sustancias, desempeñando el papel de amortiguador de impactos ambientales, regulando la movilidad y biodisponibilidad de diferentes elementos, reivindicándose como medio de vida y reserva de la mayor y menos conocida diversidad genética.

Cuando de extracción minera se trata, se debe tener presente que todo yacimiento de recurso mineral se encuentra contenido de forma subterránea, por lo cual no hay posibilidad alguna de realizar su extracción sin afectar directamente el suelo y la vegetación sobre este mismo, al punto que su destrucción es inevitable, así como su contaminación producto de los residuos resultantes. En ese orden de ideas, la recuperación del suelo consiste en su remediación y la restauración de su vegetación.

Al tomar como referencia la definición propuesta por la RAE respecto al término recuperación, se tiene que es el proceso de volver a tomar o adquirir lo que antes se tenía, pero en este contexto, no necesariamente se logrará llegar hasta el estado

original del suelo, sin embargo, el objetivo principal es garantizar su funcionalidad en cuanto servicios ambientales se refiere. Pero para ello es necesario emplear ciertas técnicas y métodos dependiendo del estado y las circunstancias en las que se encuentre el suelo. A pesar de lo complicada que pueda resultar la comprensión de la recuperación del recurso, autores como Bradshaw [5], se han dedicado a representar gráficamente el proceso de recuperación utilizando como base representaciones esquemáticas similares a las desarrolladas para ilustrar los procesos que intervienen en la restauración de ecosistemas enteros [6] entendiendo el suelo como componente del ecosistema (**Figura 1**).

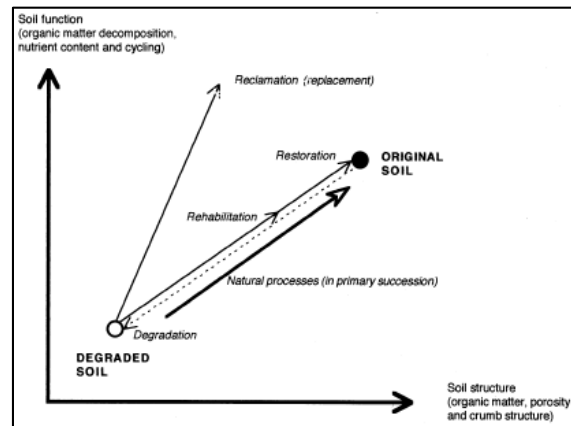


Figura 1: Recuperación de los suelos en áreas degradadas por la minería
Fuente: Restoration of mined lands—using natural processes, Bradshaw, 1992

Como se observa en la anterior figura, el estado ideal del suelo se da cuando existe un equilibrio entre la función y su estructura, ahora bien, si a esta figura se le agregara la variable tiempo se tendría que el proceso natural de recuperación tomaría un periodo prolongado, el cual se denominaría rehabilitación. Con la remediación lo que se busca es minimizar este periodo y así adquirir la mayor cantidad de cualidades iniciales del recurso.

2.1 CONTEXTO INTERNACIONAL

De acuerdo a lo mencionado por Macías [7] en cuanto a recuperación de suelos degradados, se sabe que en Europa las amenazas identificadas que afectan a los suelos son la Erosión, Pérdida de materia orgánica, Contaminación, Sellado u ocupación destructiva, Compactación, Reducción de la biodiversidad, Salinización, Inundaciones y Deslizamientos de Tierras, donde los procesos de contaminación y degradación presentan una mayor relevancia en relación con los daños directos e indirectos que tienen como derivación el descenso de la eficacia de las funciones del suelo.

Para poder controlar lo que se venía presentando y en pro de evitar mayores impactos negativos, en el marco continental se estableció el Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente 2001-2010, en el cual se le dio una significativa relevancia al establecimiento de mecanismos para la Protección del Suelo y así

generar un mejor y más eficiente manejo a la Erosión y la Contaminación. A partir de ahí se estableció una estrategia, en la cual se identificaron cinco grupos de trabajo enfocados en la Erosión, Contaminación y Pérdida de Materia Orgánica, también se evidenció la necesidad de incrementar la Investigación, la vigilancia y control de la Calidad de los Suelos por medio de monitoreos. Estos grupos temáticos han sido de gran apoyo para la elaboración de la Estrategia Europea de Protección del Suelo presentando conclusiones importantes y un sustancial volumen de documentación, lo cual ha servido para generar políticas de actuación.

Ahora, contextualizando el caso español, la preocupación por redimir la gran extensión de suelos que se han visto afectados en su composición físico química por procesos de degradación ha permitido que se desarrolle una identificación y caracterización de estos, Entre los más importantes resalta la contaminación del recurso. La contaminación de suelos en España es un proceso de importante magnitud generado por diferentes factores, entre los cuales se destacan las actividades industriales y las extractivas como la minería, la creación de infraestructuras y la agricultura. Hay algunas zonas de industrialización antigua y por consiguiente en desmejora, como las que se hallan en el País Vasco, Asturias o el entorno de Barcelona, las cuales presentan suelos contaminados por subproductos industriales y urbanos. Otras zonas puntuales en el resto de España se encuentran asociadas a áreas dedicadas a la industria química, es el caso de Huelva, Valencia, entre otras, las cuales presentan el mismo inconveniente, donde los principales contaminantes son los metales pesados, hidrocarburos y los agentes acidificantes. En cuanto a las actividades mineras, estas datan desde hace aproximadamente 4.000 años, donde importantes explotaciones han generado suelos contaminados que están destinados a recuperación, Un ejemplo de ello es la faja pirítica andaluza, la cual se extiende por el sur de Portugal, Huelva y Sevilla, desplegando gran número de minas abandonadas con serios problemas de acidificación a causa de la oxidación de sulfuros, elevados contenidos de As, Cu, Pb, Zn y, a veces, Hg, derivado de procesos de amalgamación para la recuperación de metales preciosos.[8]

En Provincias como Asturias, León, Galicia y Teruel, hay presencia minera de carbón, con problemas de acidificación, ausencia de materia orgánica y fertilidad. Así como lo referente a las canteras de rocas y explotaciones de arcillas. Cuando de Agricultura se trata, concretamente a la de tipo intensivo, se han evidenciado procesos de contaminación de suelos con magnitudes significativas en algunas áreas de las provincias de Valencia, Murcia, Almería, entre otros, los cuales son causados por pesticidas, exceso de nitratos y fosfatos, que finalmente se han logrado extender a la gran mayoría de zonas intervenidas, incrementando los riesgos de eutrofización y reducción de la potabilidad de las aguas.

Como se ha mencionado previamente, el recuperar estos suelos degradados implica una exigencia y una serie de medidas por de más costosas, que incluso pueden llegar a generar afecciones, como es el caso de la pérdida de los horizontes superficiales del suelo en el momento en que se emplea en labores de restauración ambiental. Naturalmente, al momento de restaurar, el emplear este tipo de

materiales en calidad de préstamo edáfico se convierte en la solución más adecuada para generar una rápida regeneración de la actividad biológica, sin embargo, en la medida que sea posible, las labores de recuperación deben ejecutarse con recursos como el material de descapote sólo cuando estos van a ser intervenidos o sustraídos, por lo cual, se aconseja acompañar el sustituto por otros materiales residuales que permitan corregir la contaminación y reconstruir un sistema edáfico adecuado, un ejemplo serían los lodos.

Como se ha podido evidenciar, España es uno de los países que más empeño ha puesto a la investigación de recuperación de suelos, de acuerdo a la dinámica que se ha venido presentando en Europa con la actual crisis ambiental. Es por ello que institutos como el Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA) ha generado estudios como el desarrollado por Marqués, M.J., Jiménez, L., Alonso-Blázquez, N., García-Estríngana, P., Alegre, J., y Bienes, R. [8-1], en el cual se realiza la evaluación de la contaminación por metales pesados al emplear lodos de “depuradora” o de PTAR para recuperar suelo. Para este caso, los autores exponen que el mal manejo del recurso para labores agrícolas ha generado una pérdida considerable de nutrientes, a tal punto que la situación es prácticamente generalizada, por lo cual, se ha contemplado usar los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales originados en las áreas urbanas, como fuente aportante de nutrientes. De igual manera, no es un tema nuevo el uso de estos lodos en Europa, ya que hacia los años 70 comenzaron a emplearse como fertilizantes, lo cual ha implicado un control cada vez más estricto en cuanto a la calidad de estos residuos, lo que se ha logrado en gran parte gracias al marco normativo que se encarga de regular tanto las concentraciones como las cantidades máximas aplicables al suelo, ya que si bien es cierto, al estar estos lodos cargados de metales pesados, el proceso natural indica que la acumulación y saturación es casi inevitable generando a largo plazo un foco de contaminación.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, el IMIA llevó a cabo un estudio que para efectos de reflejar la articulación entre los niveles máximos permisibles de metales pesados y los beneficios del uso de los lodos en la recuperación de suelos, se cita textualmente con el objetivo de conservar de forma fidedigna los resultados obtenidos.

Se aplicaron lodos compostados de depuradora (PTAR) como enmienda orgánica de suelos clasificados como *Gipsiorthid cámbico* según la asociación Soil Taxonomy [9]. Estos suelos presentan bajos contenidos en materia orgánica, con el horizonte superficial frecuentemente deteriorado.

La vegetación herbácea natural presente en las parcelas estaba compuesta fundamentalmente por gramíneas (*Bromus* sp., *Echinaria* sp., *Hordeum* sp., *Poa* sp., etc.) y leguminosas (*Astragalus* sp., *Coronilla* sp., *Medicago* sp. etc.) también estaban presentes *Cerastium* sp., *Taraxacum* sp., *Papaver* sp., *Plantago* sp., *Anagallis* sp., *Valerianella*, sp. etc. Se realizó una revegetalización con *Atriplex halimus* (Chenopodiaceae). Los suelos se separaron mediante parcelas tipo Gerlach de 0,5 m de anchura x 2 m de longitud, con una pendiente del 10%. Se

dispusieron tres series de 12 parcelas, cada una de ellas con un tipo de suelo distinto, entendiendo como tipo de suelo la definición de la asociación de taxonomía del suelo según la cual los tipos de suelo se distinguen exclusivamente por diferencias debidas a los horizontes superficiales.

Se simularon 6 lluvias con una pluviometría equivalente a 100 mm, de una duración de 15 minutos cada una sobre cada parcela (6 lluvias x 36 parcelas = 216 sucesos). Se recogieron los sedimentos arrastrados por erosión hídrica así como el agua de escorrentía. En laboratorio se llevó a cabo la decantación, secado y tamización. Se cuantificó el suelo tamizado a través de malla de 2 mm de luz. La fracción recogida, es decir, la “tierra fina” estaba prácticamente exenta de restos vegetales que aportaran un peso significativo.

La densidad de la vegetación (dm^3), se estimó midiendo la altura de la vegetación (media de 2 series de 11 medidas/parcela) y la superficie ocupada por ésta (media de 9 estimas/parcela) en el momento de realizar la lluvia simulada.

Para el análisis de metales en el sedimento, se realizó una digestión con agua regia (método estándar ISO EN 13346) de un peso aproximado de 0,5 g de sedimento en Microondas con reactores de alta presión. Se empleó espectrometría de emisión atómica de plasma con acoplamiento Inducido (ICP-AES). Los porcentajes de recuperación del método se expresan en la (**Tabla 1**). Los tratamientos estadísticos de los datos se realizaron mediante test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov. [10]

Tabla 1: Porcentajes de recuperación del método empleado. El material de referencia (Catalog No: CRM005-050, Lot No: J050 de Resource Tech. Corp.) Consistió también en suelo enmendado con lodo de depuradora (PTAR)

Metal	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
% Recuperación	103%	113%	86%	114%	96%	95%	88%

Fuente: Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria, 2003

Como resultados en cuanto al control de calidad de los lodos utilizados en la (**Tabla 2**) se puede apreciar que estos están dentro de los límites de concentraciones recomendadas por el marco normativo. Las cantidades aplicadas de metales a los lodos también respetan las concentraciones máximas a añadir por año.

Tabla 2: Concentración de metales en los lodos aplicados y cantidades recomendadas por la normativa vigente. Cantidades previstas añadidas en los distintos tratamientos aplicados a las parcelas

Metal	media concentración lodos mg/kg	valor límite máximo en lodos (*)	límites que se propondrán próximamente en la CEE (**)	Orden de 28 de mayo de 1998 sobre fertilizantes y afines	Concentración máxima a introducir (*) kg ha ⁻¹ año ⁻¹	Cantidad de metales previstas que se añaden utilizando dosis de lodo de		
						8 t ha ⁻¹	15 t ha ⁻¹	20 t ha ⁻¹
						kg ha ⁻¹ año ⁻¹		
Cd	3,3	20-40	10	3	0,15	0,027	0,050	0,067
Cr	396	n.i.	1000	270	n.i.	3,164	5,933	7,910
Cu	377	1000-1750	1000	450	12	3,013	5,650	7,533
Fe	13832	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	110,7	207,5	276,6
Mn	231	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	1,848	3,465	4,619
Ni	57	300-400	300	120	3	0,457	0,857	1,142
Pb	148	750-1200	750	150	15	1,182	2,216	2,954

n.i.: no indicada. Se trata de elementos que no se contemplan como peligrosos para el entorno en la legislación actual. (*) DIRECTIVA 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986. Concentraciones máximas permitidas de metales pesados en suelos (mg/kg materia seca) cuyo pH sea de 6 a 7. Los datos de la concentración máxima a introducir se basan en una media de 10 años. (**) MULV (2001)

Fuente: Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria, 2003

En cuanto al control de la erosión, el aporte de lodos actúa de forma efectiva como enmienda orgánica, incrementándose el contenido de materia orgánica tal como se aprecia en la (Tabla 1).

Tabla 3: Media y desviación típica del contenido de materia orgánica en sedimentos. (a: diferencias significativas con p<0,05)

Dosis (t ha ⁻¹)	n	M.O. (%)	D.T.
0	6	1,81 a	± 0,20
8	6	2,92	± 0,85
15	6	3,27	± 1,08
20	6	2,59	± 0,31

Fuente: Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria, 2003

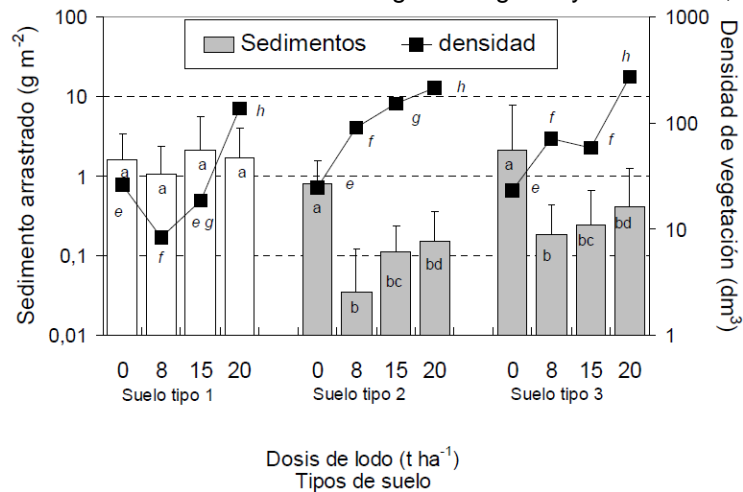


Figura 2: Suelo arrastrado y densidad de la vegetación en los tipos de suelo considerados. Las cantidades señaladas con distintas letras son significativamente diferentes (p<0,05). N° de repeticiones en cada dosis, n=18.

Fuente: Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria, 2003

El efecto que tiene la materia orgánica sobre la vegetación de las parcelas se aprecia en la (**Figura 2**). En todos los tipos de suelo que se consideraron, hay diferencias significativas entre el control y la máxima dosis, pasando la densidad de vegetación de 25 a 210 dm³. No obstante, existen ciertas diferencias entre los tres tipos de suelo; en el primero hay un contenido en yeso superior que ha podido inhibir el desarrollo de la vegetación. En las parcelas que fueron situadas en este tipo de suelo hay mayores pérdidas que en los otros dos grupos. Exceptuando este tipo de suelo, se evidenció que existe mayor arrastre de sedimentos en las parcelas que no han sido sometidas a la aplicación de lodo. Excluyendo los datos obtenidos en la primera serie de parcelas, cuya variabilidad impide obtener conclusiones, y con la debida prudencia a la hora de extrapolar un parámetro obtenido para una escala de superficie pequeña, el aporte de lodo da lugar a que la pérdida de sedimento descienda desde una media de 14,7 kg ha⁻¹ en las parcelas control con escasa vegetación, a 2,8 kg ha⁻¹ en las de mayor dosis de lodo, pasando de una escala de riesgo de erosión de moderada a nula o ligera según la clasificación de Albaladejo y Stocking. [11]

Como conclusión del estudio se determinó que el empleo de lodos procedentes de residuos sólidos urbanos favorece el proceso de restauración de este suelo degradado incrementando significativamente el contenido en materia orgánica y la densidad de la vegetación.

La capacidad de contaminación difusa procedente de suelos sometidos al aporte de este tipo de lodos, disminuye si se consigue una proliferación de la vegetación, cuya densidad suponga un freno significativo al arrastre de sedimentos por erosión hídrica.

Existen otros estudios como los desarrollados en la universidad de Liverpool por autores como Bradshaw [5-1] quien sugiere que el desarrollo y recuperación del suelo posterior a las explotaciones mineras puede quedar en manos de los procesos naturales, sin embargo este proceso de sucesión natural se puede dar a un ritmo lento, y es común que tarden de 50 a 100 años antes de que se consiga un proceso satisfactorio que permita el desarrollo de la cobertura vegetal, sobre todo en los residuos resultantes de la actividad minera. Los diversos análisis referentes a sucesiones sobre sustratos naturales y artificiales expresan que uno de los problemas más importantes que limitan el ritmo de desarrollo del suelo es la generación de especies foráneas, lo anterior, teniendo en cuenta como medidas de recuperación la revegetalización en las zonas intervenidas.

La colonización natural es una herramienta poderosa en algunas situaciones, ya que se pueden seleccionar las especies que se van a sembrar, y mediante una variedad de técnicas se puede garantizar el uso de las semillas adecuadas, con lo cual se obtiene un control y rango deseado de especies adecuadas para la labor superando así los problemas que afectan el establecimiento de las plántulas. Técnicas como la revegetalización mediante hidrosiembra son de las más comunes a emplear en este tipo de situaciones, a lo cual, la carga de nutrientes la podrían aportar los lodos.

2.2 CONTEXTO NACIONAL

Desde la academia se ha venido generando la voluntad para hacer de la materia orgánica un elemento aprovechable, esto se ha dado por ejemplo en el manejo que se le ha venido dando a los lodos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR, las cuales siempre han estado en búsqueda de alternativas para reducir costos de mantenimiento y disposición por el manejo que se le ha venido dando a los residuos, por lo cual se ha llegado a plantear el uso de estos residuos en la recuperación de suelos. Sin embargo, es importante contemplar variables como la composición de los lodos, ya que estos están directamente relacionados con la carga contaminante que ingresa en la PTAR.

Como se ha venido mencionando, en Colombia, de momento no hay un marco normativo claro en cuanto a recuperación de suelos se refiere, así mismo, el uso de biosólidos se encuentra de cierta manera restringido debido a sus características químicas y biológicas, sin embargo, el marco de referencia con el cual se ha planteado manejarlos es bajo la Norma 40 CFR parte 503 de la EPA, allí se definen como un material orgánico resultante del tratamiento de aguas residuales que puede ser usado sin crear afectaciones sobre la población intervenida. Se les clasifica como Tipo A y B; siendo los tipo A aptos para cultivos agrícolas y los tipo B, aquellos que pueden ser usados en actividades que no tengan contacto directo con personas como acondicionadores de suelos. A pesar de ello, por principio de precaución no se recomienda aplicarlos directamente sobre el suelo, ya que su variabilidad en cuanto a composición no permite saber a ciencia cierta el nivel de peligrosidad al disponerlos. Es por ello que se recomienda llevar a cabo un proceso de estabilización previo para lograr su equilibrio y mejorar sus características. [12]

Biosólidos no solo se encuentran en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, en las Plantas de Tratamiento de Lixiviados también se generan, un ejemplo de ello es el Relleno Sanitario Doña Juana, el cual dentro de sus zonas de disposición cuenta con una zona para disposición de biosólidos. Algunas de estas zonas ya han sido clausuradas, por lo cual se han empleado algunos mecanismos para tratar de regresar el suelo al estado más próximo al original, es decir que en este momento cuenta con cobertura vegetal sobre los desechos, pero para poder lograr esta conformación fue necesario impermeabilizar los residuos con lona plástica entretejida recubierta por una película de polietileno, posteriormente se dispone una capa de arcilla de aproximadamente 80 cm de espesor, y sobre esta se dispone una mezcla de biosólido y tierra negra de 40 cm de espesor, una vez conformadas estas capas se procede a instalar la cobertura vegetal la cual se verá beneficiada por el aporte de materia orgánica aportada por el biosólido.

En el mencionado botadero se realizó una caracterización físico química en los suelos empleados como cobertura final, dicho estudio se llevó a cabo por (Pinzón y Sotelo,[13], donde se eligió la zona IV de disposición de residuos sólidos, la cual fue clausurada en 1999, una vez allá se eligieron seis parcelas de 1m² distribuidas en

un área de 50 m², se introdujo un tubo de PVC de 4” de diámetro a una profundidad de 40 cm con el objetivo de extraer 1 Kg de muestra de suelo para la respectiva caracterización. Como resultado, el estudio arrojó que la cobertura de la zona IV no contaba con nivel de acidez adecuado, sin embargo era bueno, también se encontró cierta variación en el potasio, el cual oscilaba entre bajo y excesivo, se hallaron niveles importantemente altos de nitrógeno y excesivas concentraciones de azufre, lo cual influye en los índices de fertilidad y en las características generales del suelo.

Adicional a lo anterior, se observó que la capa de cobertura vegetal está principalmente compuesta por pasto, lo cual ayuda a prevenir la erosión eólica. Además, se pudieron apreciar algunas especies arbustivas, sin contemplar algún patrón de distribución. Con el análisis también se logró determinar que el suelo es un suelo franco arenoso con una acidez entre 5-6, con niveles excesivos N y S, óptimos de P, K y Ca, así como una concentración deficiente de Mg, en comparación con las zonas aledañas donde los terrenos son bajos en nutrientes. Se determinó también que dicha concentración ayudaría al desarrollo de las especies nativas del corredor ecológico del Sumapaz, pero podrían verse afectadas en su desarrollo, por la heterogeneidad de los nutrientes de estos suelos.

En un concepto más general, y como se ha venido tratando, es evidente que hay una recuperación del suelo, en un menor tiempo al que podría tardar con la sucesión natural, sin embargo, las características presentadas en el estudio aun distan de las originales, ahora bien, el hecho de que se pueda presentar un desarrollo de las especies nativas del corredor ecológico del Sumapaz, ya se puede apreciar como un servicio ambiental.

2.3 COMPENSACIONES AMBIENTALES EN COLOMBIA

De acuerdo a la propuesta realizada por FUNDEPÚBLICO, [14], respecto a los bancos de hábitat como herramienta de compensación ambiental en Colombia, menciona que el concepto de compensación ambiental nace a partir de la jerarquía de la mitigación, la cual insta que las compensaciones ambientales únicamente se deben realizar cuando todas las acciones de prevención y mitigación han sido agotadas.

Para el caso colombiano, las medidas de compensación ambiental han sido parte de los procesos de licenciamiento ambiental desde hace aproximadamente veinte años (artículo 50, Ley 99 de 1993). Sin embargo, los lineamientos y los criterios para definir y realizar las compensaciones aún siguen siendo desarrollados por las autoridades ambientales. Para el año 2012 Colombia adjuntó a su ordenamiento jurídico la obligatoriedad de las compensaciones ambientales, realizadas bajo el principio de la “no pérdida neta” y la “equivalencia ecosistémica”, a través de la adopción del “Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad”. Es por ello que estos dos principios obligan a que las compensaciones ambientales se lleven a cabo mediante actividades de restauración y conservación en los ecosistemas impactados. [4-1]

En el contexto nacional, el requerimiento para realizar compensaciones ambientales está enmarcado bajo cuatro instrumentos: la licencia ambiental, la sustracción de áreas de reserva forestal, el aprovechamiento forestal y la compensación por aprovechamiento de especies amenazadas. Estos aspectos están amparados por los artículos 8, 58, 79, 80 y 95, Constitución de 1991 y en la Ley 99 de 1993. Para el presente análisis, teniendo presente que el marco que se ha elegido es el de los proyectos sujetos a licenciamiento ambiental, se abordarán las directrices establecidas para las compensaciones por obligación de licencia ambiental.

La Ley 99 de 1993 en su Título VIII contiene el régimen de licencias ambientales, el cual establece la obligatoriedad para el desarrollo de cualquier actividad que pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente, o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje (Constitución Política 1991, artículo 79).

La licencia ambiental es entonces, el prerequisite para el ejercer los derechos otorgados por otras autorizaciones, permisos, contratos o concesiones y esta debe acompañarse de un plan de manejo ambiental. La licencia ambiental está sujeta al “cumplimiento por el beneficiario de la licencia y de los requisitos que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales de la obra o actividad autorizada” (Constitución Política 1991, artículo 50).

La misma ley asigna las competencias para efectos de las licencias ambientales entre el Ministerio de Ambiente, ANLA, las corporaciones autónomas regionales (CAR) y los distritos, municipios y áreas metropolitanas, dependiendo de la industria o actividad y del tamaño y localización del proyecto. También delega al Ministerio como responsable para establecer por medio de reglamento, los casos en los cuales las CAR otorgarán licencias ambientales y aquellos en que se requiera estudio de impacto ambiental (EIA) (Constitución Política 1991, artículo 21) y diagnóstico ambiental de alternativas (DAA) (Constitución Política 1991, artículo 17). Los EIA y DAA deben ser elaborados de acuerdo con las metodologías adoptadas por medio de la Resolución 1503 de 2010 del Ministerio de Ambiente y la establecida en el artículo 14, Decreto 2041, respectivamente.

Para el caso de las medidas de manejo ambiental, el Decreto 2041 establece medidas de corrección, mitigación y compensación. Las de compensación las define como aquellas encaminadas a resarcir y retribuir a las comunidades, las regiones, las localidades y el entorno natural por los impactos o efectos negativos que no puedan ser corregidos, mitigados o sustituidos” (artículo 1, Decreto 2041 de 2014). De acuerdo con esta definición, la misma licencia ambiental establecerá las medidas de compensación a que haya lugar, siguiendo las particularidades del proyecto y la afectación determinada en el respectivo estudio.

2.4 MAPEO DE FÓRMULAS EQUIVALENTES – Ma.F.E v 2.0

Como se ha dicho previamente, el manual para asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad, tiene como meta brindar las directrices para determinar y cuantificar las medidas de compensación por pérdida de biodiversidad. Por lo tanto, este se convierte en un instrumento de uso obligatorio para los beneficiarios de la licencia ambiental, en la elaboración de los estudios de impacto ambiental y para la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, en la evaluación y aprobación de las medidas de compensación en el proceso de licenciamiento ambiental y sus modificaciones.

Básicamente el manual da alcance a tres instancias necesarias para llevar a cabo la compensación, estas son:

- **Cuánto compensar en términos de área:** Para poder llevar a cabo el cálculo del área a compensar, la herramienta propone el uso de factores de compensación por pérdida de biodiversidad, los cuales están compuestos por representatividad de los ecosistemas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas; rareza; remanencia y tasa de pérdida anual de ecosistemas. Los valores del factor oscilan entre 4 a 10 para ecosistemas naturales y de 2 a 5 para vegetación secundaria.
- **Dónde realizar la compensación:** Las compensaciones deben dirigirse preferiblemente a conservar áreas ecológicamente equivalentes a las afectadas, donde la biodiversidad es viable por área, condición y contexto paisajístico y, donde se logre generar una nueva categoría de manejo o estrategia de conservación por la vida útil del Proyecto sujeto a licencia ambiental.
- **Cómo compensar:** La compensación se realizará a través de acciones de conservación y restauración. Para alcanzar el área de compensación se podrán realizar acciones de conservación, restauración y/o herramientas de manejo de paisaje. Esta última herramienta en áreas transformadas hasta cumplir con el área de compensación establecida.

Ahora bien, para el mapeo de fórmulas equivalentes (Mapping Alternatives for Equivalentents) habría que empezar por Ma.F.E v1.1, herramienta que trabaja en el software ArcGIS 10, pero a diferencia de su predecesora es una herramienta que no requiere de software licenciado para su uso. La nueva versión de la herramienta (Ma.F.E v2.0.) permite identificar los fragmentos del mismo tipo de ecosistema afectado, con igual o mejor viabilidad por tamaño y contexto paisajístico e igual o mayor riqueza de especies que podrían ser objeto de compensación y que además cumplen con el área a compensar y/o factor de compensación. [15]

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo los requerimientos del Manual para la Asignación de Compensación por Pérdida de Biodiversidad, se procedió a instalar en un Computador de escritorio la herramienta Ma.F.E v2.0., una vez cumplidos los requisitos del software, se despliega en el navegador de internet el siguiente aplicativo.



Figura 3: Interfaz de Ma.F.E v2.0

Fuente: Manual del usuario para la herramienta Ma.F.E v2.0, 2012

Así mismo se eligió un Proyecto minero sujeto a licenciamiento ambiental, con el cual se pudiera llevar a cabo el ejercicio, dicho proyecto se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca, en el municipio de Mosquera, zona rural de la vereda Balsillas. El área del proyecto cuenta con 144,54 Ha, y está dividida en 5 frentes de explotación minera.

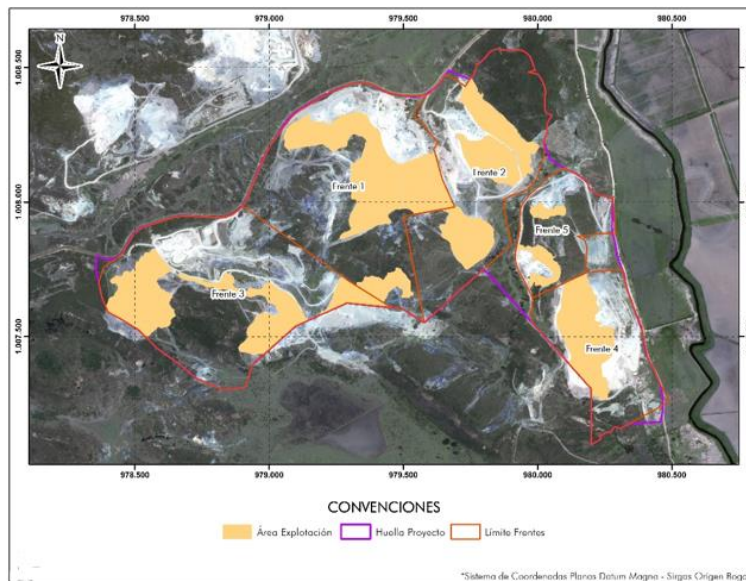


Figura 4: área del proyecto minero

Fuente: Inversiones Mondoñedo S.A.S, 2012

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez reunida la información e instalada la herramienta se procedió a ingresar los datos de entrada, los cuales se encontraban en formato Shape, estos contenían la capa de ecosistemas con los distritos biogeográficos con los que se identifican los impactos y se buscan las áreas equivalentes. El área del proyecto con todas las áreas que a intervenir y sobre las cuales se cuantifica la pérdida de ecosistemas terrestres naturales y seminaturales. Por último, las áreas de exclusión, las cuales constituyen una sensibilidad significativa por su alta representatividad ambiental.

Luego de la carga de los archivos, la herramienta lleva a cabo la vinculación del campo ecosistemas-distrito biogeográfico con los nombres contenidos en el listado nacional de factores de compensación e identifica los casos coincidentes y no coincidentes. Para este caso se obtuvieron dos coincidencias.

Tabla 4: Listado de factores de compensación

Ecosistema	Factor de Compensación
Afloramientos rocosos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Aguas continentales artificiales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Aguas continentales naturales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Arbustales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	5.50
Áreas mayormente alteradas del helobioma Andino en NorAndina E_Cord_Oriental_Helobiomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas mayormente alteradas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas urbanas del helobioma Andino en NorAndina E_Cord_Oriental_Helobiomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas urbanas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Bosques plantados del helobioma Andino en NorAndina E_Cord_Oriental_Helobiomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Bosques plantados del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Cultivos anuales o transitorios del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Herbazales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	5.50
Hidrofitia continental del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Pastos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Zonas desnudas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA

Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Ecosistema	Factor de Compensación
Alfarcamientos rocosos del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Agua continental artificial del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Agua continental natural del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Alfarcamientos del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	5.50
Áreas mayormente aboradas del heloboma Andino en NoAndina E_Cord_Oriental_Helobomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas mayormente aboradas del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas urbanas del heloboma Andino en NoAndina E_Cord_Oriental_Helobomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Áreas urbanas del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Bosques plantados del heloboma Andino en NoAndina E_Cord_Oriental_Helobomas andinos	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Bosques plantados del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Cultivos anuales o transitorios del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Helocarpas del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	5.50
Heloboma contrastal del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA
Pastos del oroboma medio de los Andes en NoAndina E_Cord_Oriental_Orobomas medios de los Andes	NO EXISTE EL ECOSISTEMA

Figura 5: Listado de factores de compensación
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

En cuanto a la capa del proyecto se incluyó todo lo que se encontró dentro del área del proyecto, al realizar este cargue se obtuvo el siguiente resultado.

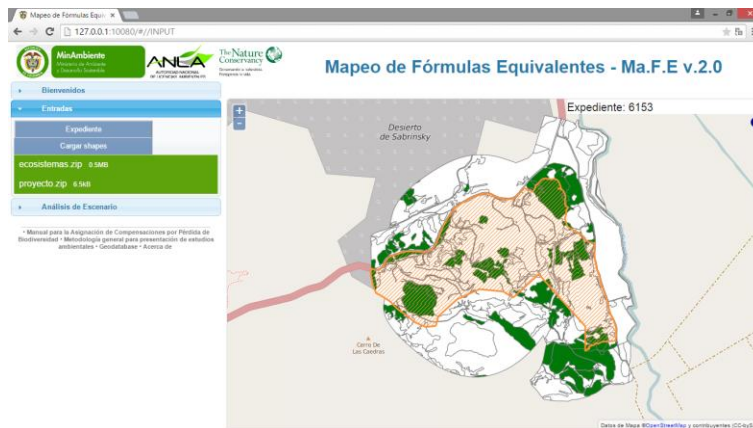


Figura 6: Cruce entre el área del proyecto y ecosistemas
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Para este caso es necesario fue necesario incorporar la capa áreas de exclusión la cual corresponde a la realineación de reserva Forestal Protectora-Productora de la Cuenca Alta del Río Bogotá emitida bajo resolución 0138 de 2014, luego de cargar la respectiva capa se generó el siguiente resultado.

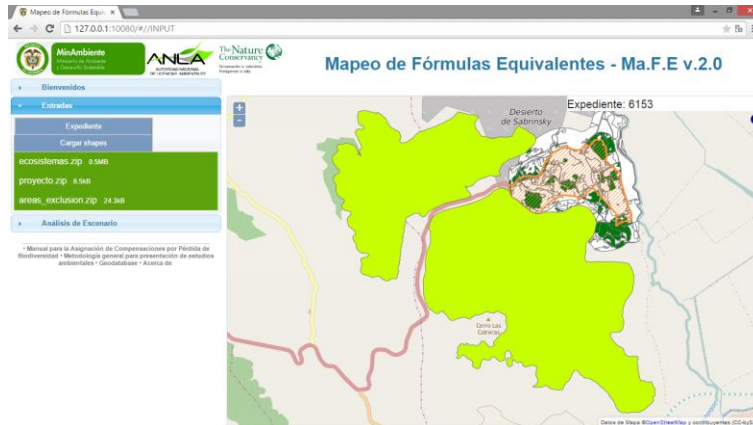


Figura 7: Áreas de exclusión
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Luego de haber cargado las tres capas, el sistema se encarga de generar un análisis mediante una tabla en la cual se consignan los ecosistemas impactados por el proyecto, dicha tabla se emite en formato (.pdf).

Ecosistema	# Fragmentos impactados	Área Impactada	Área Impactada Promedio	Área Impactada Mínima	Área Impactada Máxima	Área Impactada Desviación	Contexto Paisajístico Promedio	Contexto Paisajístico Mínimo	Cor Pai M&B
Afloramientos rocosos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	3	0.3 Ha	0.1 Ha	0 Ha	0.2 Ha	0.1 Ha	0.8702	0.6701	0.97
Aguas continentales artificiales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	14	0.3 Ha	0 Ha	0 Ha	0.1 Ha	0 Ha	0.962	0.6974	1
Áreas mayormente alteradas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	2	91.3 Ha	45.7 Ha	0.1 Ha	91.2 Ha	64.5 Ha	0.8024	0.6048	1
Bosques plantados del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	3	0.8 Ha	0.3 Ha	0.2 Ha	0.3 Ha	0.1 Ha	1	0.9999	1
Herbazales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	21	28.2 Ha	1.3 Ha	0.1 Ha	6.7 Ha	1.9 Ha	0.9183	0.457	1
Pastos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	35	17.6 Ha	0.5 Ha	0 Ha	3.3 Ha	0.8 Ha	0.9608	0.6304	1
Zonas desnudas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	28	6 Ha	0.2 Ha	0 Ha	0.9 Ha	0.2 Ha	0.9389	0.4389	1

Descargar lista

Figura 8: Informe de ecosistemas impactados
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Luego de obtener el informe de los ecosistemas impactados, la herramienta permite visualizar y descargar dichos ecosistemas para buscar equivalencias, este resultado se muestra en la siguiente figura.

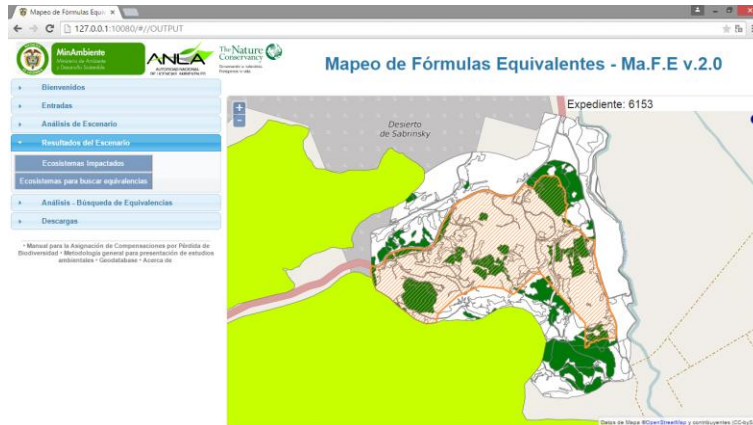


Figura 9: Resultados del escenario
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Así mismo se genera un informe con un listado de ecosistemas para buscar equivalencias, este listado se relaciona a continuación.

Ecosistema	# Fragmentos	Área Total	Área Promedio	Área Mínima	Área Máxima	Área Desviación	Contexto Paisajístico Promedio	Contexto Paisajístico Mínimo	Contexto Paisajístico Máximo	C
Afloramientos rocosos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	6	6.8 Ha	1.1 Ha	0.2 Ha	2.7 Ha	1 Ha	0.9217	0.6701	1	C
Aguas continentales artificiales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	7	0.1 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0.9257	0.6001	1	C
Aguas continentales naturales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	1	0.5 Ha	0.5 Ha	0.5 Ha	0.5 Ha	0 Ha	0.6348	0.6348	0.6348	C
Arbustales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	5	0.2 Ha	0 Ha	0 Ha	0.1 Ha	0 Ha	0.574	0.4607	0.9774	C
Áreas mayormente alteradas del helobioma Andino en NorAndina E_Cord_Oriental_Helobiomas andinos	2	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0.3695	0.262	0.477	C
Áreas mayormente alteradas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	7	36.1 Ha	5.2 Ha	0.1 Ha	34.5 Ha	12.9 Ha	0.7397	0.5682	1	C
Áreas urbanas del helobioma Andino en NorAndina E_Cord_Oriental_Helobiomas andinos	2	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0 Ha	0.403	0.3805	0.4255	C
Áreas urbanas del orobioma medio de los Andes en	4	1 Ha	0.2 Ha	0 Ha	0.8 Ha	0.4 Ha	0.4868	0.3658	0.7631	C

Figura 10: Informe de ecosistemas para buscar equivalencias
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Una vez se tenga los ecosistemas identificados se ejecuta la herramienta Análisis – Búsqueda de Equivalencias, para cada uno de los ecosistemas impactados que cumplen con el área de análisis mayor a 1 Ha. A continuación se muestra un ejemplo de los cuatro ecosistemas resultantes del ejercicio.

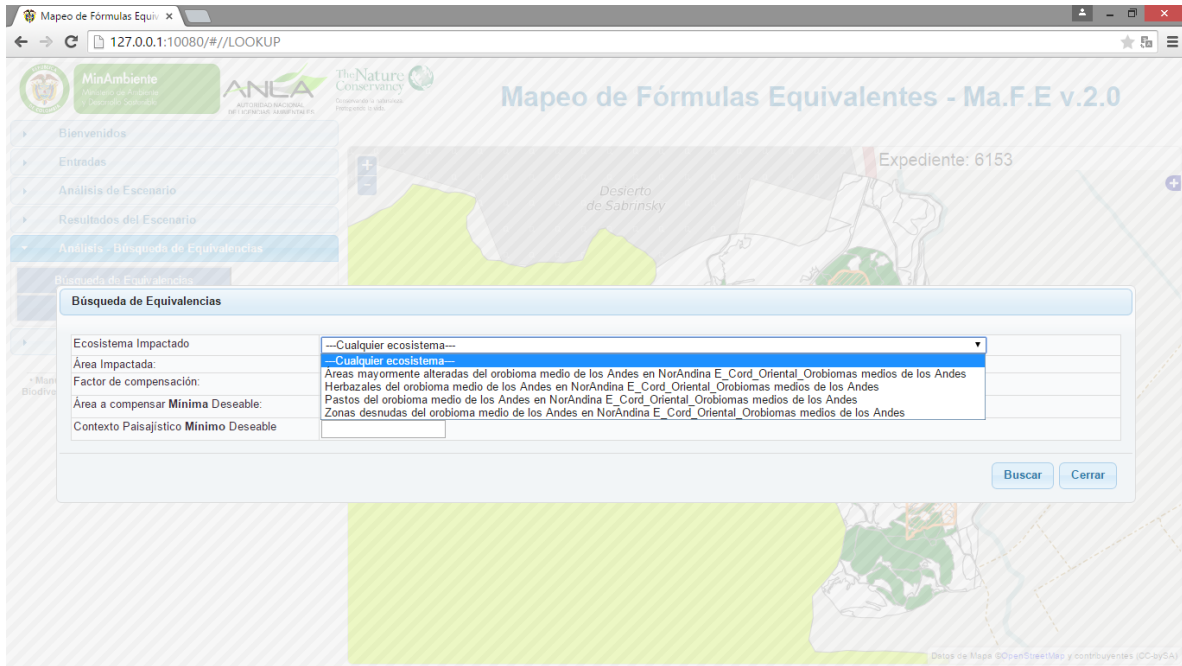


Figura 11: Búsqueda de equivalencia por ecosistema impactado
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

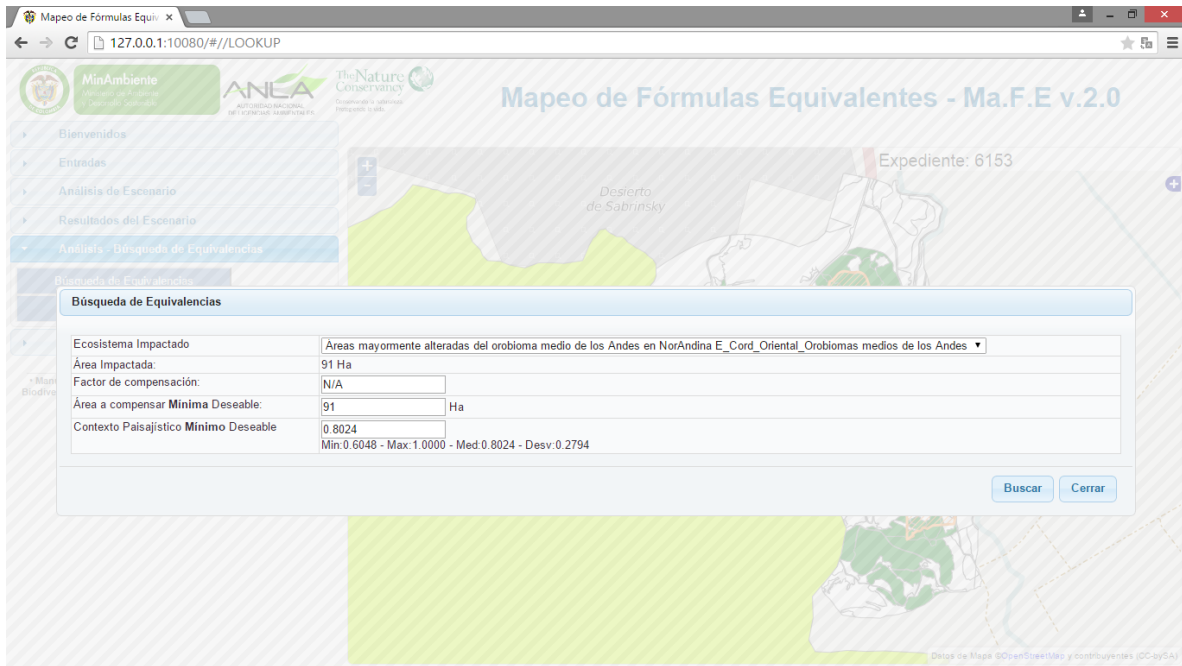


Figura 12: Determinación de áreas de compensación
Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Una vez se ha realizado el anterior procedimiento con cada uno de los ecosistemas propuestos por la herramienta, es posible revisar las búsquedas guardadas, donde se puede evidenciar el resultado general de los ecosistemas con su respectiva área a compensar la cual se encuentra en hectáreas.

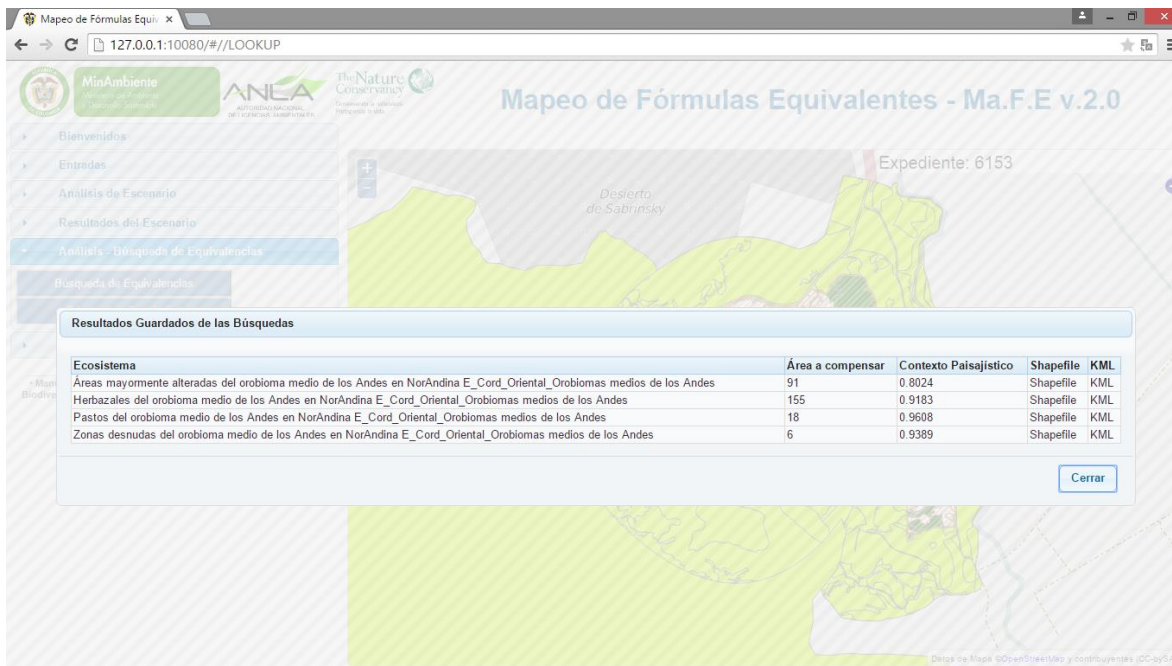


Figura 13: Resultado de áreas a compensar

Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Tabla 5: Áreas a compensar

Ecosistema	Área a compensar	Contexto Paisajístico
Áreas mayormente alteradas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	91	0.8024
Herbazales del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	155	0.9183
Pastos del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	18	0.9608
Zonas desnudas del orobioma medio de los Andes en NorAndina E_Cord_Oriental_Orobiomas medios de los Andes	6	0.9389

Fuente: Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, 2015

Ahora bien, como se ha mencionado al inicio de este escrito, el suelo se reconoce como parte funcional de los ecosistemas, por lo tanto, si el mapeo de fórmulas equivalentes propone áreas a compensar con base en los ecosistemas afectados, la compensación de suelos se puede articular a dicha herramienta, lo anterior teniendo presente que en la Política Para la Gestión Integral del Suelo - GIAS se ha hecho una identificación preliminar de las funciones y servicios ecosistémicos de los suelos en el escenario nacional, junto con sus características y localización.

Si desde la institucionalidad ambiental se cartografiara la situación actual de los suelos en Colombia, cuantificando las áreas degradadas con requerimientos de recuperación, y se tuviera un registro histórico de la cantidad de lodos producidos por tratamiento de aguas residuales vs los biosólidos tratados prestos a disposición,

se podría pensar en un modelo de compensación basado en el que realiza el Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, donde al beneficiario de la licencia ambiental se le requiera realizar compensación de acuerdo a las determinaciones de la herramienta encargada de generar los parámetros de compensación.

5 CONCLUSIONES

Es evidente que al suelo se le ha empezado a dar su lugar como parte integral de los ecosistemas, es decir que su importancia radica a partir de sus funciones y servicios ecosistémicos, sin embargo no existe un marco normativo claro en cuanto a los bienes y servicios que este provee, por lo tanto su degradación se ha venido dando de manera acelerada debido a que no hay unas medidas de control que promuevan su conservación o tan si quiera su recuperación.

Existen muchas técnicas y métodos para recuperar el suelo, los casos más exitosos de han dado a nivel internacional, específicamente en Europa, donde la tecnología se desempeña como el percutor que brinda sinergia a todos esos métodos empleados, que al final coinciden en un objetivo común, el cual consiste en recuperar el suelo, de manera sostenible, minimizando costos y a partir de los residuos sólidos o biosólidos. Para el caso Colombiano se sabe que el principio básico de recuperación de suelos está en conjugar la materia orgánica con la cobertura vegetal, por lo cual lo más común es mezclar estos biosólidos generadores de grandes volúmenes de materia orgánica ricos en nutrientes, para que funcionen como proveedores de sustento a la cobertura vegetal que finalmente reducirá en términos de tiempo la recuperación del suelo, sin embargo, llevar a cabo estos procedimientos generan costos que suelen ser elevados, por lo cual, la sugerencia es externalizar estos costos a los beneficiarios de licencias ambientales, lo anterior, teniendo en cuenta que son ellos con sus respectivas actividades industriales los que más afección al suelo generan. Por lo tanto, generar una herramienta basada en el Mapeo de Fórmulas Equivalentes Ma.F.E v2.0, pero adaptada a la compensación y recuperación de suelos puede abrir la posibilidad de mitigar en un alto porcentaje la degradación de suelo que actualmente sigue sin control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MONCAYO, G. 2005. Manejo ecológicamente compatible de las cuencas de Tungurahua; Digestión anaeróbica y diseño de biodigestores. [<http://www.aqualimpia.com>]. Ecuador.
2. OROPEZA, 2006. Lodos residuales: estabilización y manejo. Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo. México
3. AGUILAR, BOTERO. 2006. Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. Tierra Tropical
4. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Viceministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. 2012. Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad
5. BRADSHAW. 1996. Restoration of mined lands—using natural processes, University of Liverpool, UK.
6. Forbes, A.M. and J.J. Magnuson. 1980. Decomposition and microbial colonization of leaves in a stream modified by coal ash effluent. *Hydrobiologia*, USA.
7. Macías, F.; Calvo, R.; Arce, F.; Bulnes, C.; López, R. (2001). Los suelos como sumideros de carbono: materia orgánica de los suelos de Galicia. En XXII Reun. Nac. de la SECS. Dpto. Edafología. Univ. Santiago.
8. Dpto. Investigación en Desarrollo Rural. Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA). 2011. Evaluación de la contaminación difusa por metales pesados originada por erosión hídrica en suelos enmendados con lodos de depuradora
9. USDA - Water Erosion Prediction Project. 1995. Hillslope profile and watershed model documentation.
10. KOLMOGOROV, 1941. SMIRNOV, 1948. Stochastic specification and the estimation of share equations. USA.
11. ALBALADEJO Y STOCKING. 1989. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. USA
12. PINZÓN. 2011. Caracterización físico química de lodos de lixiviados. Bogotá

13. PINZÓN Y SOTELO. 2011. Análisis de las características físicas y químicas de los suelos empleados como cobertura final en el Relleno Sanitario Doña Juana. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá
14. FUNDEPÚBLICO - Fundación para la defensa del interés público. 2014. Hacia un sistema de bancos de hábitat como herramienta de compensación ambiental en Colombia. Colombia
15. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Convenio de asociación No.25 de 2012 – MADS, ANLA Y TNC. 2012. Manual del usuario para la herramienta Ma.F.E v2.0. Colombia