



GEOTECNIA AMBIENTAL EN OBRAS CIVILES.

BRAYAN ELIECER DURAN RINCÓN
SEBASTIÁN OLIVELLA ACOSTA

VICTOR HUGO VERJEL TARAZONA
ING. CIVIL MSC EN GESTIÓN DE PROYECTOS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PAMPLONA

2022



SC-CER96940



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. LA GEOTECNIA AMBIENTAL.....	3
1.1 Geotecnia y los suelos.....	3
1.2 Geotecnia y el aire.....	4
1.3 Geotecnia y el agua.....	5
2. EVALUACION GEOTECNICA DE OBRAS	7
2.1 Tipo de deposito.....	7
2.2 Tipo de proyecto.....	8
2.3 Trabajos preliminares de campo.....	8
2.4 Investigaciones de campo.....	9
2.5 Muestreo.....	9
3. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA LA GEOTECNIA AMBIENTAL EN OBRAS CIVILES.....	10
3.1 Sistemas de indicadores sostenibles.....	11
3.1.1 Directrices integradas de sostenibilidad para la gestión (por sus siglas en inglés: SIGMA):	11



SC-CER96940





3.1.2 Rutina de evaluación de proyectos sostenibles (por sus siglas en inglés: SPEAR)	12
3.1.3 Método de evaluación ambiental del establecimiento de investigación de edificios (por sus siglas en inglés: BREEAM)	13
3.1.4 Ecopuntos	14
3.1.5 Ceequal	15
3.2 Sistema de indicadores de la geotecnia ambiental (por sus siglas en inglés: EGI).	16
3.2.1 Formación del sistema EGI	16
3.2.2 Análisis de etapas del proyecto	18
3.2.3 Implementación del sistema de indicadores de sostenibilidad de la geotecnia ambiental en obras civiles	20
4. LA GEOTECNIA AMBIENTAL Y SU PAPEL EN LA ACTUAL PANDEMIA DEL COVID 19 PARA EL DESARROLLO DE OBRAS CIVILES.	22
4.1 Interacción entre patógenos y suelos	22
4.1.1 Detección de patógenos en el suelo y en los sedimentos:	23
4.1.2 Resistencia de los patógenos a los antibióticos y su efecto en la geotecnia.	23



4.1.3	Cambios de las propiedades del suelo a causa de los patógenos.	24
4.1.4	Erosión del suelo y control del polvo.	24
4.1.5	Estudios de residuos sólidos municipales.	25
4.2	Formas de contener y remediar suelos contaminados con patógenos.	25
	Contención.....	25
	Remediación	28
5.	GEOTECNIA AMBIENTAL Y TRANSPORTE EN LA INGENIERÍA CIVIL. .	33
5.1	Uso de residuos de quema de carbón en la ingeniería civil	33
5.2	Uso de material triturado.....	37
5.3	Recuperación de suelos por derrames en vías.	40
6.	LA GEOTECNIA AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y DEPÓSITOS.....	46
6.1	Disposición final de residuos peligrosos.....	46
6.2	Estabilización de taludes con revegetación.....	51
	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	61



SC-CER96940





TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Diagrama Spear (ARUP, 2014)	13
Ilustración 2: Diagrama de rosas típico, que muestra varias etapas del proyecto para su uso con el sistema EGI (Jefferson et al. 2007).....	18
Ilustración 3: Trayectoria de migración y punto de riesgo para la humanidad de COVID 19 en un sistema de agua. (Rowe et al., 2004).....	27
Ilustración 4: Ladrillos hechos de la mezcla de plástico fundido con arena y arcilla. (Vitone YJ et al. 2021).....	31
Ilustración 5: Resistencia a la compresión de grava, arena y arcilla mezclada con plástico fundido. (Vitone YJ et al. 2021).....	32
Ilustración 6: Disposición y compactación de ceniza estabilizada en aplicación húmeda. Republica Checa, 2016 (Vaníček, Jiráskoa, & Vaníčekb, 2017).....	35
Ilustración 7: Diferentes tipos de fibra usados (marcas) (Vaníček, Jiráskoa, & Vaníčekb, 2017).	36
Ilustración 8: Hormigón y ladrillo triturado (Vaníček, Jiráskoa, & Vaníčekb, 2017)	37
Ilustración 9: Modelo de dique reforzado antes y después del desborde (Vaníček, Jiráskoa, & Vaníčekb, 2017).....	38



Ilustración 10: Influencia del porcentaje de fibra en la mezcla reciclada (Vaníček, Jiráskoa, & Vaníčekb, 2017).....	39
Ilustración 11: Suelo con altos niveles de hidrocarburo. (UNAM, 2012).....	41
Ilustración 12: Número de muestreos según el área afectada (García & Pérez, 2010). ..	42
Ilustración 13: Distanciamiento recomendado según el contaminante (García & Pérez, 2010). ..	43
Ilustración 14: Estratigrafía y modelo conceptual (Torres, 2019).....	45
Ilustración 15: Pares de sustancias comunes incompatibles (León, 2004). ..	47
Ilustración 16: Composición general de rellenos sanitarios (León, 2004).....	48
Ilustración 17: Factores inherentes a la estabilidad de taludes (Rodríguez, 2006). ..	52
Ilustración 18: Diseño del talud en software Geo5, (Arauzo, 2020).....	53
Ilustración 19: Conformación del talud estabilizado, (Arauzo, 2020). ..	54
Ilustración 20: Anclajes de geomalla (Arauzo, 2020).....	56
Ilustración 21: Contención de rocas por la geomalla (Arauzo, 2020).....	56



INTRODUCCIÓN

La Geotecnia Ambiental tiene su inicio principalmente gracias a la ingeniería geotécnica y el trabajo sobre el flujo a través del suelo por medio de compactación para reducir su permeabilidad (como en presas de tierra) (Rowe, 2018). Posteriormente se adecua a la necesidad de intervenir ingenierilmente los suelos, con la característica de que esta intervención no genere un impacto ambiental negativo en el terreno intervenido y circundante y promueva el desarrollo sostenible (Jirásko, 2017).

La Geotecnia Ambiental toma gran participación en la solución de algunos problemas producidos en los suelos debido a grandes fuentes de contaminación generadas por algunas actividades que se presentan cotidianamente como lo pueden ser el vertimiento de residuos sólidos sin tratamiento alguno que al ser depositados en sitios que no posean las obras de contención adecuadas, se producirán lixiviados que llegarán al suelo por medio de la infiltración y a los cuerpos hídricos debido a la escorrentía superficial; otro problema se genera debido a la poca participación en la necesidad global actual debido a que la mayoría de países poseen un modelo económico focalizado en la extracción y transformación de materias primas, lo que propicia que estos hagan parte del ciclo de contaminación y restauración de los suelos que trata el documento al mencionar casos como el derrame de hidrocarburos y el uso de cenizas producto de combustiones en la conformación de vías (Rowe et al. 2004). Las dos condiciones anteriores proponen una intervención agresiva y con repercusiones claras a los ecosistemas y he ahí la



relevancia que representa la geotecnia ambiental en su amplio sentido de remoción, contención, rehabilitación y tratamiento de los suelos. Sí bien, algunas de las actividades como el transporte de hidrocarburos no impacta en sobre manera el ecosistema sí cuenta con diferentes procesos que representan un riesgo ambiental latente como lo sería un accidente de los vehículos transportadores o una fuga en un sitio de extracción (Rowe, 2018).

A nivel mundial se han visto problemas medioambientales en todos los medios del planeta (como el aire, agua y suelo) que son el soporte vital del ser humano, estos problemas, han ido creciendo enormemente debido a diversos factores que aún no son controlados al 100% por los organismos ambientales (Pardo, 2004). La geotecnia ambiental presenta unas posibles soluciones proponiendo mecanismos de contención, remediación, rehabilitación y tratamiento para los suelos (según sea necesario) dependiendo si están contaminados (derrames de combustibles fósiles) o puedan ser sometidos en un futuro con una gran carga de contaminantes (sitios de disposición de residuos sólidos).

Esta recopilación de información está encaminada en la contención de contaminantes, remediación y el reciclaje de desechos producto de la construcción y procesos industriales, con el fin de mitigar la el impacto ambiental en los suelos incentivando el desarrollo sostenible que influya en la investigación de nuevos métodos, el uso de diferentes recursos con aparente nula utilidad que puedan ser usados en procesos constructivos así alargando su vida útil, para minimizar el impacto ambiental por lo menos en los suelos.



1. LA GEOTECNIA AMBIENTAL

Debido el crecimiento exponencial que presentan los países, la conservación del medio ambiente es uno de los principales aspectos a tener en cuenta ya que el agua, el aire y los suelos son el soporte vital para los seres vivos. Al momento de emprender un proyecto el cual comprenda la construcción de cualquier tipo de obra civil (ya sea de mediana escala como una vivienda o una de gran escala como los puertos o las vías principales) es necesario evaluar, no solamente los impactos medioambientales que estos tendrán en cada uno de los componentes del medio ambiente (aire, suelo y agua) sino también hacer una evaluación detallada de los efectos sociales económicas y culturales que este produciría. La geotecnia ambiental la podemos asociar a tres grandes grupos de estudio los cuales son el agua, el aire y los suelos (León, 2004).

1.1 Geotecnia y los suelos.

La mayor parte de la superficie terrestre está conformada por agua con 70% mientras que el suelo 30% el cual es un componente insustituible del medio ambiente, está constituido por organismos, materia orgánica, minerales, agua e incluso aire los que en conjunto forman funciones vitales para la Tierra (IDEAM, s.f).

El suelo es parte esencial de los ciclos biogeoquímicos, en los cuales hay distribución, transporte, almacenamiento y transformación de materiales y energía necesarios para la vida en el planeta (Miegrot & Johnsson 2009; Martin, 1998).



Al momento de realizar cualquier acción que implique utilizar el suelo, como la construcción de una edificación o cualquier tipo de siembra se pierde la capa vegetal de esta que es la protección natural que posee el suelo para que procesos como la erosión por parte del agua o del aire no se den. La erosión no es el único problema que presentan los suelos diariamente, también se presenta constante contaminación debido a diversos factores como lo pueden ser el uso de los vehículos de automotor que presentan derrames de aceites o combustible debido a fallas mecánicas en sus sistemas, también la descomposición de los residuos en los lugares de disposición final (León, 2004).

1.2 Geotecnia y el aire.

La geotecnia y el aire ha sido una pareja poco estudiada a lo largo de la historia, pero crea fenómenos que se han venido produciendo a medida que los siglos han ido avanzando. Uno de los principales problemas dentro de este grupo es la erosión eólica que es un factor causado por el viento que produce un considerable desgaste de las rocas que no estén tan compactadas y el levantamiento del suelo transportando las partículas. La erosión eólica generalmente se produce en zonas montañosas, áridas o en zonas desérticas ya que en estas zonas las diferencias tan abrumadoras de la temperatura hacen que las rocas se desgasten y sean más frágiles haciendo posible esta erosión (León, 2004).

Por otra parte, nos encontramos con el control de polvos que se generan producto de las construcciones o por la contaminación producto de la quema de combustibles fósiles.



1.3 Geotecnia y el agua.

El agua es el recurso natural máspreciado que tenemos los seres vivos, durante la historia la humanidad se ha desarrollado en zonas cercanas a las fuentes de agua y cuando no es posible, se han construido inmensos acueductos para transportar durante varios kilómetros el agua sin embargo, las aguas se contaminan luego de usarlas y en las plantas de tratamientos, generalmente no se tienen las precauciones necesarias para que estas aguas residuales no se infiltren al suelo y generen contaminación no solamente del suelo, sino de los acuíferos que se puedan encontrar en el subsuelo. Las aguas lluvias también pueden generar otros problemas como puede ser las aguas de escorrentía contaminadas producida de los cultivos que son fumigados que van contaminando el suelo y los cuerpos hídricos donde se deposita, así como también generando erosiones cuantiosas en los suelos (León, 2004).

Los suelos y todos los componentes que este tiene siempre se han visto afectados no solo por los vertimientos cuyo lugar de disposición son rellenos sanitarios, sino también por las construcciones civiles que se vienen realizando en el transcurso de la historia de la humanidad; es por esto que la geotecnia ambiental, es sumamente importante para minimizar los impactos medioambientales que se han convertido en un problema muy grande debido al crecimiento abrumador de la población humana. La geotecnia ambiental tiene como objetivo principal contribuir a la sostenibilidad del planeta que habitamos con acciones biológicas, ecológicas e



incluso químicas, pero sobre todo ingenieriles que puedan evitar contaminación del suelo o de los cuerpos hídricos que se encuentren en sus cercanías (León, 2004).

La geotecnia ambiental tiene muchas aplicaciones, pero en sus inicios se ha centrado en los residuos y como estos pueden afectar geotécnicamente al medio ambiente (como ejemplo, al momento de verter los residuos sólidos productos de la actividad cotidiana de un municipio/ciudad en un lugar de disposición final, estos se van a degradar con el paso de los años por acciones biológicas o químicas lo que genera que los suelos cambien sus características geotécnicas) pero estas aplicaciones se han ido aumentando incluso al punto de interactuar con análisis hidrológicos y geotécnicos (León, 2004).

La geotecnia ambiental ha contribuido enormemente al campo de la remodelación de suelos y aguas subterráneas (Bhandari, 2007), también a la instalación y ejecución de sistemas de contención para el control de la migración de contaminantes (Rowe, 2014). Esta influencia es sumamente importante ya que presenta objetivos para solventar problemas de análisis hidrológicos y geotécnicos a los que la geotecnia puede aportar de una manera eficaz.

Como bien es sabido, las investigaciones de ingeniería en los últimos tiempos siempre se han basado en que deben ser sostenibles, esto por supuesto, está ligado a la sociología, el medio ambiente y la tecnología y a la economía por lo cual se incluyen las áreas de reutilización, de reciclaje o de reingeniería de materiales.



2. EVALUACION GEOTECNICA DE OBRAS

Una aplicación de la geotecnia ambiental se ve cuando se necesita hacer una evaluación geotécnica en algún suelo donde se vaya a hacer alguna obra civil, estas pruebas arrojan características y apreciaciones sobre la aptitud o limitaciones del desarrollo que permitirán una buena ejecución del proyecto.

Al ejecutar una exploración del suelo necesaria para tener un conocimiento fidedigno sobre las propiedades tanto físicas como mecánicas de este, es necesario conocer todos los factores que influyen en este proceso (Universidad Tecnológica de Bolívar, s.f):

2.1 Tipo de deposito

Estos pueden ser homogéneos o heterogéneos dependiendo la zona de estudio, en los depósitos homogéneos se pueden observar estratos del suelo definidos claramente y es recomendable reducir las perforaciones porque no es necesario por su homogeneidad; los depósitos heterogéneos por otra parte, muestran perfiles no definidos e irregulares donde es importante aumentar los estudios de laboratorios para determinar los suelos duros y blandos (Simancas, s.f).



2.2 Tipo de proyecto.

Los proyectos pueden clasificarse en 3 tipos de envergaduras (Simancas, s.f), los cuales son:

- Proyectos pequeños que van desde edificios máximo de 2 pisos, hasta la pavimentación de una carretera, estos no suelen necesitar exploraciones tan profundas.
- Proyectos grandes que van desde edificaciones de 3 y 7 pisos o plantas industriales, en este tipo, los ensayos se deben hacer en una profundidad mayor y en diferentes puntos.
- Proyectos especiales que comprenden todas las edificaciones de más de 8 pisos, sitios de almacenamiento o tanques y requieren muchas cantidades de perforaciones y ensayos de laboratorios.

2.3 Trabajos preliminares de campo.

- Recolección de información disponible.

Como estudios de suelos provenientes de construcciones adyacentes e información de las actividades sísmicas.

- Inspección directa del lugar y las áreas adyacentes.

Líneas de drenaje, vegetación de la zona, cuerpos hídricos adyacentes, yacimientos de agua etc.

- Reconocimientos aéreos.

Fotointerpretación de la zona, fotografías de zonas de difíciles accesos.



2.4 Investigaciones de campo

Las investigaciones de campo ayudan a la evaluación de la problemática que se quiere resolver bajo puntos de vista específicos, también son importantes para reconocer el perfil estratigráfico del suelo y la evaluación del suelo mecánicamente (Simancas, s.f).

2.5 Muestreo

El muestreo se realiza principalmente para identificar los materiales que componen el subsuelo donde se aplica el proyecto de construcción aplicando las técnicas y los procedimientos correspondientes. Las muestras pueden ser inalteradas que es cuando se conserva la estructura o alteradas cuando esta no se conserva (Simancas, s.f).

Al finalizar los procesos anteriores, arrojará una evaluación geotécnica correcta la cual nos dictará si el terreno es recomendado para la realización de la obra que se tiene pactada hacer sin tener un problema en un futuro.



3. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA LA GEOTECNIA AMBIENTAL EN OBRAS CIVILES.

A medida que pasan los años, el desarrollo sostenible se ha convertido en una de las características más a tener en cuenta al momento de realizar cualquier acción en pro del crecimiento como población, ya que es necesario remediar las alteraciones que se producen en nuestro medio sólido como es el suelo, pero sin afectar el medio ambiente, esto conlleva un gran problema ya que no es fácil aplicarlo debido a la desigualdad social, pobreza o superpoblación Jefferson et al. (2007).

Acá entra la geotecnia ambiental que es capaz de hacer una enorme contribución al campo de la sostenibilidad tomada de la mano con la construcción, aun siendo esta ultima una de las principales causantes de afectar drásticamente el desarrollo sostenible.

Las obras civiles convencionales, tienen muy desarrollados los señalizadores de desempeño sostenible, pero esto es porque el sector de la construcción es una práctica que presenta mayor longevidad en las diferentes civilizaciones. Por otra parte, la geotecnia ambiental no cuenta con la misma suerte y no porque sea relativamente nueva comparada a las obras civiles, sino que se presenta más complicado por la escala específica del sitio inherente. Debido a este problema, Jefferson, Birchall y Rogers, (2006) presentaron un nuevo sistema el cual presenta un conjunto de indicadores geotécnicos ambientales el cual se basa en los existentes del sector de la construcción, estos se definieron tomando en cuenta muchos factores.



Se presentaron 108 indicadores diferentes los cuales tenían un sistema de puntuación desde el 1 hasta el 5 (siendo el 1 dañino y el 5 significativamente mejorado), estos, aplicados a un proyecto pueden cumplir el cronograma completo de este, en 8 etapas distintas (las cuales van de factible a largo plazo). Estos 108 indicadores están divididos en dos grandes grupos, los cuales son 76 indicadores genéricos que son los utilizados para saber el nivel de sostenibilidad de cualquier proyecto geotécnico y 32 indicadores los cuales son los específicos de la tecnología que se usan para evaluar los terrenos contaminados (Estos pueden ser modificados o cambiados según se necesite para el tipo de proyecto) Jefferson et al. (2007).

3.1 Sistemas de indicadores sostenibles

Para empezar a definir los indicadores de sostenibilidad para la geotecnia ambiental, es importante examinar los indicadores relacionados a la construcción ya que estos son la base para el inicio de estos, se deben considerar aspectos como lo son la validez o el nivel de aplicación. Para que un sistema de indicadores sostenibles pueda ser viable, tiene que haber sido aplicado en gran medida en proyectos de gran envergadura y también deberán ser acogidos por las empresas que lo soliciten (Jefferson et al. 2007).

3.1.1 Directrices integradas de sostenibilidad para la gestión (por sus siglas en inglés:

SIGMA):

SIGMA fue un sistema que se centraba plenamente en desarrollar un pensamiento de sostenibilidad en las organizaciones las cuales lo utilizaban, fue compartida en el año 1999 con el



SC-CER96940





apoyo del departamento de industria y comercio del Reino Unido y daba a conocer tres herramientas absolutamente claves que son:

- a) Los factores principales que se usan a nivel organizacional y que a su vez promueven la sostenibilidad son (el capital humano, la economía, lo social, la empresa de la manufactura y lo natural)
- b) El marco de gestión que adhiere a la sostenibilidad en procesos centrales y toma de decisiones a nivel empresarial.
- c) Y el conjunto de herramientas para la evaluación.

3.1.2 Rutina de evaluación de proyectos sostenibles (por sus siglas en inglés: SPEAR)

Desarrollado por ARUP en 2014, este método está basado en un diagrama de rosas el cual está distribuido en colores los cuales clasifican la sostenibilidad del proyecto al cual este aplicado ceñido a cuatro principales grupos, los cuales son los recursos económicos, sociales, naturales o ambientales. Puede ser aplicado a proyectos de construcción, productos y organizaciones (ARUP, 2014).

Para la clasificación se usan puntajes numéricos que van desde -3 siendo este el peor de los casos hasta el +3 donde se podría asegurar decir que es un caso optimo. Dentro de esto, las áreas donde se encuentren problemas se pueden se pueden clasificar dentro de 20 subtemas dependiendo del problema que estos presenten como pueden ser la calidad del aire o el uso del suelo. Este



método es sumamente útil cuando se utiliza para calcular la situación de un proyecto antes, durante e incluso después de haberlo construido (Jefferson et al. 2007).

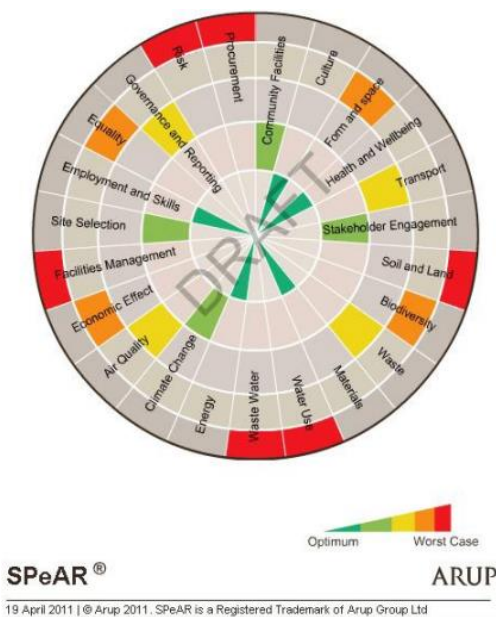


Ilustración 1: *Diagrama Spear (ARUP, 2014)*

3.1.3 Método de evaluación ambiental del establecimiento de investigación de edificios (por sus siglas en inglés: BREEAM)

Fue publicado por primera vez por Building Research Establishment en 1990, este método se basa en indicar medioambientalmente la sostenibilidad que tienen construcciones de edificios específicos (oficinas, escuelas, etc.) ya sean nuevos o existentes. Dentro de los temas más importantes utilizados para evaluar este sistema son: el uso de la energía, la salud, los materiales



y el agua, el uso del suelo, entre otros. Para la determinación de los puntajes de sostenibilidad, en este método existen dos tipos de calificación, cuantitativa y cualitativa. Una es la porcentual la cual esta enlazada con su respectiva categoría es decir 40% aprobado, 50% bueno, 60% muy bueno y 70% es excelente y la otra es aplicada para el sistema ECOHOMES donde el uso de la energía tiene diferentes desgloses como lo son emisión de dióxido de carbono, espacios de secado altos e iluminación extrema, para este sistema se aplica una puntuación basada en el desempeño ambiental que va desde 1 siendo el peor hasta el 10 que es el mejor. Ambos sistemas de puntuación etiquetan ecológicamente a los edificios que usan esta metodología y cada vez es más usado, pero tiene un gran problema el cual es que este método no se concentra en los pilares económicos ni sociales (Jefferson et al. 2007).

3.1.4 Ecopuntos

El sistema de eco puntos, es un instrumento de evaluación ambiental el cual es de puntuación única y se utiliza para evaluar impactos ambientales de un edificio, así como también procesos medio ambientales usando una calificación que va desde 1 a 100 donde uno es el menor impacto posible y 100 el mayor. Este método, tiene en cuenta impactos como el cambio climático, la eliminación de desechos, el agotamiento de ozono entre otras cosas (Jefferson et al. 2007).

Anteriormente se mostraron que existen muchísimos indicadores de sostenibilidad disponibles aplicados a la ingeniería civil que están situados en muchas escalas (a nivel proyecto,



hasta materiales de construcción específicos). El estudio de estos, ha distinguido las características más importantes las cuales son:

- a) Los indicadores ambientales y económicos están mucho mejor desarrollados que el sector social.
- b) Los sistemas de puntuación que están establecidos pueden variar de acuerdo a la producción final.
- c) Los indicadores de sostenibilidad deben ser únicamente relacionados con la sostenibilidad y no ser una medida al azar.
- d) Se deben adoptar y aplicar los sistemas existentes ya que la sostenibilidad es un problema mundial.

3.1.5 Ceequal

Es un método que busca que haya excelencia en el medio ambiente en las áreas del agua, la energía, la tierra, la ecología, el paisaje entre otros. Este método premia la sostenibilidad de los proyectos relacionados con la ingeniería civil, su método de puntuación no es muy diferente al de Bream, pero cambia en que el 25% se relaciona con aprobado y el 75% con excelente, es usado ampliamente en la ingeniería en el Reino Unido (Sustainability Exchange, s.f).



3.2 Sistema de indicadores de la geotecnia ambiental (por sus siglas en inglés: EGI).

3.2.1 Formación del sistema EGI

El sistema de indicadores de la geotecnia ambiental derivó de volver a generar desde el punto de vista de la geotecnia, los indicadores sostenibles utilizados en la construcción del Reino Unido, también utilizando ideas adicionales basadas en indicadores ambientales tomadas de otros países como Leed en Estados Unidos o HK-Beam en Hong Kong. Este diseño fue generado para ser utilizado en Reino Unido, pero todas sus ideas pueden ser transferibles a cualquier parte del mundo, pero necesitaría una reformulación de algunos de los indicadores existentes o también la inclusión de nuevos indicadores específicos de cada país (Jefferson et al. 2007).

Los indicadores tienen como finalidad garantizar una unión entre el presente y posible futuro de los marcos de gestión para la geotecnia ambiental como lo pueden ser los procedimientos que se hacen para gestionar la contaminación del suelo. El sistema EGI incluye todos los indicadores de sostenibilidad existentes pero que han sido adaptados a la geotecnia ambiental mediante el uso de indicadores específicos, estos incorporan factores que van desde políticas empresariales pasando por evaluaciones específicas del sitio (como el espaciamiento de pruebas químicas utilizadas previamente a un tratamiento). (Jefferson et al. 2007).

Las etapas de los indicadores de la geotecnia ambiental van desde la A-H como se muestra más adelante, se presentan en orden cronológico y cada una describe procesos claves que afectan la sustentabilidad. La escala de la línea del tiempo, tiene una descripción evidente sobre las fases



de un proyecto lo que permite una fácil lectura lo que permite realizar posibles interacciones durante el cronograma del proyecto. (Jefferson et al. 2007).

Cada etapa proyectada recibe al final una calificación de 5 que se calcula a partir de los indicadores genéricos. También existen los indicadores que dependen de los métodos de remediación (remoción, contención, ex situ, in situ y pasiva) los cuales son los indicadores específicos de la técnica, que se aplican según corresponda; por ejemplo, al evaluar un lugar donde se vean aplicadas técnicas de remoción, se requerirán los indicadores en la etapa de diseño. los indicadores genéricos tienen como medida el uso de puntos: de 1 a 5 siendo 1 dañino y el 5 significativamente mejorado. Este sistema de calificación, permite una asignación muy completa ya que utilizar medidas cuantitativas en lugar de cualitativas (según se pueda aplicar) elimina la variación del resultado de una evaluación el cual era la principal falla de los sistemas utilizados en construcción. Una vez se tienen las puntuaciones de cada etapa del proyecto, estas etapas se promedian y se grafican como se muestran en la Ilustración 2 donde es posible observar e identificar cuáles son los puntos de sostenibilidad más débiles en el proyecto (Jefferson et al. 2007).

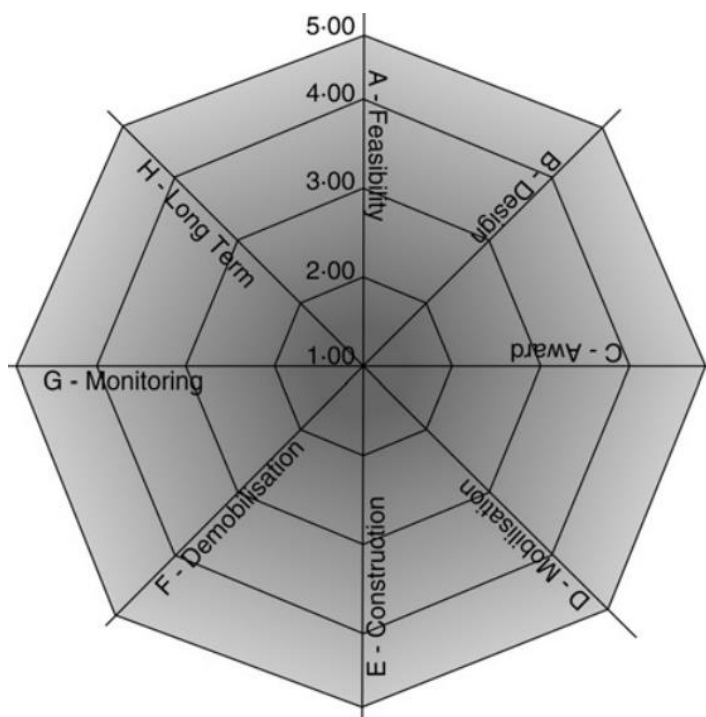


Ilustración 2: Diagrama de rosas típico, que muestra varias etapas del proyecto para su uso con el sistema EGI (Jefferson et al. 2007).

3.2.2 Análisis de etapas del proyecto

Etapa a: Dentro de esta, encontramos la viabilidad que es un estudio donde se trata de conocer si el proyecto será exitoso o no. Se incluye un estudio para identificar en que puntos específicos se necesita una investigación para reconocer donde se presentan los puntos más críticos de contaminación o análisis químicos. (Jefferson et al. 2007).

Etapa b: En esta encontramos la etapa del diseño del proyecto que son sumamente importantes debido a que en estas se pueden observar los problemas relacionados a salud y



seguridad, también se pueden evaluar los costos y con la evaluación adecuada se pueden reducir posibles riesgos de contaminación. En esta etapa es donde se deben incluir al proyecto las pautas de sostenibilidad y por parte de un equipo de diseño constituido por las personas adecuadas ya que de esta manera se facilitaría un resultado más sostenible por la inclusión temprana al proyecto. (Jefferson et al. 2007).

Etapa c: En el proceso de adquisición existe numerosas opciones como lo puede ser, pactar un acuerdo con la asociación encargada para que el contratista este especializado en geotecnia pueda participar en la etapa de factibilidad del diseño, esto no suele suceder tan seguido debido a que los clientes optan por la oferta más baja. Por esta razón, se suelen revisar las credenciales de sostenibilidad del subcontratista (Jefferson et al. 2007).

Etapa d-e-f: Estas etapas se refieren a la puesta en marcha del proyecto (los indicadores de estas etapas se aplican a la vez). El sistema de indicadores de la geotecnia ambiental se encarga de que los métodos utilizados sean sostenibles y que se apliquen en la construcción correspondiente al proyecto, también se lleva el control de la calidad del aire reduciendo el movimiento mínimo de personas y equipos lo que, a su vez, disminuye el uso de medios de transporte. Se aconseja no usar materiales productos de combustibles fósiles invitando al uso de las tecnologías de energía renovables (Jefferson et al. 2007).

Etapa g: Se hacen estudios para tener un control sobre los niveles de contaminación que se presenten.





Etapa h: Acá tenemos los factores a largo plazo los cuales son una innumerable cantidad que van desde los efectos sociales que se produzcan por el proyecto hasta el uso de la tierra.

3.2.3 Implementación del sistema de indicadores de sostenibilidad de la geotecnia ambiental en obras civiles.

La adopción de un sistema de indicadores que nos advierta de los problemas que pueden impactar negativamente a la sostenibilidad de un proyecto de manera tangible es extremadamente fundamental, ya que unos buenos pilares ambientales ayudan a que las decisiones se tomen de la manera más efectiva indicando en primera medida a los encargados de la toma de decisiones el problema que se está presentando lo que ayudaría a plantear una posible solución, esto también provocaría una mejora en lo económico, debido a que la dificultad encontrada pueda ser remediada tomando la solución más exequible en términos económicos y ambientales. (Jefferson et al. 2007).

La estructura de la línea del tiempo del sistema, se basó en el proyecto de Birmingham Eastside, esta estructura nos refleja que las etapas pueden cambiar a la etapa posterior a ella dependiendo la decisión tomada por esto, al momento de modificar una de estas, se deben reevaluar las primeramente planteadas en cada etapa de la línea del tiempo. (Jefferson et al.. 2007).

Los indicadores genéricos y los de procesos específicos del sitio, están contruidos a base de la experiencia y de los conocimientos que se van recopilando en cada momento. Durante su desarrollo del sistema, el principal objetivo fue la solución de los problemas de los suelos



contaminados, pero menos en los procesos de reutilización de cimientos o reciclaje de materiales en el sitio. (Jefferson et al.. 2007).

Este sistema presenta una gran flexibilidad lo que hace que sea muy sencillo la implementación de otros criterios que se necesiten (como el modelado integrado de recursos) que hayan sido pasado por alto. El sistema EGI, no fue creado para eliminar ni reemplazar los sistemas de sostenibilidad existentes, sino que pueden ser puestos en funcionamiento en conjunto para efectuar una efectiva y completa evaluación del proyecto al que se está aplicando, su ventaja es que no solamente mide la calidad ambiental de un proyecto, sino que también se encarga de medir la calidad social, en otras palabras, puede ser aplicado para mostrar donde se pueden obtener el mejor efecto de sostenibilidad. (Jefferson et al.. 2007).

Para el desarrollo del sistema EGI, se tomaron bases proyectadas principalmente a los terrenos específicamente a la solución de la contaminación en los suelos, se usaron menos los procesos relacionados a la construcción como el reciclaje de materiales (aunque se agregaron brevemente en la etapa D) y procesos similares. (Jefferson et al.. 2007).



4. LA GEOTECNIA AMBIENTAL Y SU PAPEL EN LA ACTUAL PANDEMIA DEL COVID 19 PARA EL DESARROLLO DE OBRAS CIVILES.

En Ginebra, el 11 de marzo de 2020, la OMS por medio de su director general, declaro que el coronavirus que había aparecido en el mundo en 2019 (COVID-19) se caracteriza como una pandemia la cual el 9 de mayo de 2020 se confirmó que ya había afectado a más de 3.5 millones de personas. Esta es la primera vez que el mundo afronta una pandemia producida por un coronavirus, pero a su vez, Tedros Adhamon director de la OMS afirmo que también era la única pandemia que puede ser controlada.

4.1 Interacción entre patógenos y suelos.

La interacción que tienen los patógenos con el suelo se ha pasado por alto desde la perspectiva de la ingeniería. Se sabe que los suelos y todas las capas de este, son ecosistemas en los cuales los microorganismos (ya sean aeróbicos o anaeróbicos) pueden vivir, adaptarse e incluso pueden evolucionar, esto representa un problema grave debido a que pueden convertirse en parte de un ciclo natural lo que los traería de vuelta a la superficie y es por ello que se hace necesario detectar los problemas que generan los patógenos ambientalmente. (Vitone YJ et al. (2021)).



4.1.1 Detección de patógenos en el suelo y en los sedimentos:

El primer paso para reconocer y evaluar los problemas que producen los patógenos en el suelo es detectar cuales y que tipos de estos se encuentran. Para hacerlo existen numerosos métodos y técnicas como la detección basada en cultivos (usados para aislar patógenos por medio de un uso amplio de mano de obra, pero sin detectar células no cultivables) o moléculas (usados para detectar ADN presente en el patógeno lo que proporciona una alta precisión). Estas técnicas, generalmente no son empleadas por ingenieros debido a que no están capacitados para hacerlas. Los métodos que se usan para esta detección acompañados de una buena delimitación lograrán una mayor precisión, rentabilidad y especificidad. (Vitone YJ et al. (2021)).

4.1.2 Resistencia de los patógenos a los antibióticos y su efecto en la geotecnia.

Siempre se han tenido a los antibióticos como la fuente más efectiva para el tratamiento y la prevención de las infecciones, sin embargo, el alto uso de estos antibióticos hace que se los patógenos adquieran una resistencia a estos lo que lleva a un gran problema a la salud mundial. Ese problema no solamente se ve en las personas con enfermedades infecciosas, sino también en las plantas de tratamiento de aguas residuales, los suelos (exceptuando a los sedimentos de permafrost) o las granjas, es por esto que es necesario realizar medidas de reconocimiento para comprender los patógenos resistentes a los antibióticos que estén presentes en los suelos. (Vitone YJ et al. (2021)).



4.1.3 Cambios de las propiedades del suelo a causa de los patógenos.

Las propiedades del suelo siempre han estado expuestas al cambio producto de los microorganismos que lleguen a estos, sin embargo, es limitado el conocimiento de cómo podrían afectar estos microorganismos al rendimiento del suelo con respecto a la ingeniería. De manera asertiva, podemos declarar que las bacterias y los hongos pueden cambiar las propiedades fisicoquímicas afectando su comportamiento y generando problemas a las obras civiles que se puedan construir en ellos pero no podemos asegurar lo mismo a cerca de los virus patógenos y es debido mayormente a que el tamaño es 100 veces más pequeño que el de la mayoría de las bacterias pero nos encontramos con el problema de que si estos virus infectan a organismos completos, cambiarían su comportamiento fisiológico y así, estos tendrían un mayor impacto en las propiedades del suelo. (Vitone YJ et al. (2021)).

4.1.4 Erosión del suelo y control del polvo.

El aire, aparte de ser uno de los mayores causantes de la erosión del suelo, es un medio que puede transportar partículas diversas incluidos los microbios, por esto es importante tener un control del polvo para imposibilitar la movilización de estos microorganismos que según estudios no publicados tienen una correlación con la contaminación del aire y el riesgo para la salud que provoca el COVID 19. (HSPH, 2020).



Prevenir la erosión del suelo es un tema que concierne a toda la población mundial, por lo que prevenirlo no arrojando basuras a las calles y aplicando métodos por parte de entidades ambientales se hace un muy necesario.

Existen algunas técnicas geotécnicas para el control de la erosión y el polvo, pero son complejas de usar debido a que se deben usar bacterias en condiciones reales para la realización de estas lo que lo hace muy peligroso debido a que puede haber un descontrol de estas, por ello, (Cheng et al., 2019; He et al., 2020; Khatami y O'Kelly, 2013) desarrollaron métodos basados en polímeros o enzimas.

4.1.5 Estudios de residuos sólidos municipales.

Los residuos sólidos poseen características similares a la de los suelos, ambos son geos materiales de múltiples fases, como la sólida, la líquida y gaseosa que pueden estar en conjunto la una a la otra, también ambos poseen microorganismos dentro de ellos. Es debido a esto que conocer los estudios de los residuos sólidos puede aportar mucho para conocer las interacciones suelo-patógeno.

4.2 Formas de contener y remediar suelos contaminados con patógenos.

Contención: Antes de proceder a la remediación de un suelo, se deben hacer investigaciones exhaustivas para comprender como los patógenos se mueven dentro de los suelos y así reconocer las maneras de cómo podrían llegar a los cuerpos hídricos y así evitar que la



contaminación de estos, siga en aumento. Los suelos debido a diversos factores tanto químicos como físicos en su estructura (el pH, la relación de vacíos, la temperatura, etc.), pueden afectar a la retención de los virus dentro del terreno (Bitton y Harvey, 1992; Potts et al., 2004). Una de las mejores maneras naturales que se dan para evitar la absorción de virus por parte del suelo es gracias a la materia orgánica que se encuentra en estos; por el contrario, suelos arcillosos o con alto contenido en magnetita, aumenta la retención de los virus.

Los suelos tienen un proceso de purificación natural el cual depende de varios factores como lo son el pH, la conductividad hidráulica, el contenido de agua, el tipo de virus en cuestión, entre otros. Dependiendo si la purificación natural del suelo es débil o fuerte, nos indica que tanto puede sobrevivir el virus en el medio y por consecuente, reduce o aumenta la capacidad de migración de estos virus hacia otros cuerpos como lo pueden ser las aguas subterráneas. Cuando el virus del COVID 19 (SARS-Cov-2) ingresa al suelo, este de alguna manera puede entrar nuevamente en contacto con las personas y convertirse en un ciclo recurrente de infección, en la figura x se muestra a el rastro de patógenos en los sistemas de agua, mientras que las rupturas en vertederos y tuberías de alcantarillado pueden introducir patógenos en los suelos (Wigginton et al., 2015).



Ilustración 3: Trayectoria de migración y punto de riesgo para la humanidad de COVID 19 en un sistema de agua. (Rowe et al., 2004).

Donde: A: heces. B: tuberías de drenaje municipal, C: Salida de aguas residuales, D: Planta de tratamiento de aguas residuales, E: salida de agua residual, F: sitio de disposición de lodos, G: Cuerpo hídrico receptor H: Fuga en las tuberías. (Rowe et al., 2004).

Por lo general, los hospitales y los lugares donde se prestan servicios sanitarios, usan reservorios subterráneos para contener las aguas residuales cargadas de patógenos producto de las actividades realizadas en estos lugares. Las tuberías que transportan estas aguas e incluso los propios reservorios pueden presentar fallas que provoquen filtración de las aguas subterráneas y el suelo, por lo que instalar revestimientos de diferentes materiales como lo pueden ser geomembranas de polietileno de alta densidad, revestimientos de arcilla geo sintética, revestimientos de arcillas compactadas y combinaciones de estos, es necesario para reducir el impacto ambiental que generan las filtraciones de estas aguas, es vital que se hagan estudios para



determinar la barrera que mejor tenga relación calidad precio para resolver el problema que se presentaría debido a que, por ejemplo, el jabón cambiaría toda la ecuación del tipo de barrera que se puede utilizar ya que cuando entra en contacto con las aguas residuales, permite un mejor transporte por las barreras hechas a base de arcillas (revestimientos de arcilla geo sintética, revestimientos de arcillas compactadas). (Rowe et al., 2004).

Remediación: Uno de los métodos utilizados para la remediación de patógenos en los suelos es la estabilización/solidificación que propone un proceso que da solución al problema mediante la fijación química y posteriormente la encapsulación física. El método de la estabilización/solidificación, se puede aplicar a los suelos contaminados con COVID-19, aplicando reactivos apropiados para inactivar y contener el virus para que no se siga propagando. Los reactivos que se usan normalmente son 1000 mg/l de desinfectante con cloro o alcohol al 75%, peróxido de ácido y de hidrogeno. Breidablik et al. (2020) propuso que se puede usar agua ozonizada como alternativa a estos reactivos. Sin embargo, el alto uso de estos en suelos que vayan a ser destinados a la construcción, puede generar impactos negativos en los materiales de la edificación.

Los residuos sólidos y los desechos médicos producidos en las viviendas de personas que estén contaminadas por el virus de SARS-CoV-2 o en centros de salud son altamente contenedores del patógeno, debido a esto, enviarlos a los sitios de disposición final como vertederos sin ninguna acción previa puede hacer que los virus sean transportados al suelo llegando a los cuerpos hídricos



contaminando todo a su paso. La técnica más usada para la eliminación de estos residuos provenientes de los centros de salud es la incineración, ya que es más económica y se puede aplicar a cualquier tipo de estos desechos médicos u reduce significativamente la propagación del virus (Deng et al., 2014; Makarichi et al., 2018; Windfeld y Brooks, 2015), pero no todos los países pueden hacer tal cosa, porque la cantidad de residuos que se generó durante pandemia supera el límite de plantas de incineración de muchos países.

Debido al problema que genera la eliminación de los residuos producidos por personas relacionadas al COVID-19, es necesario gestionar todo el volumen que se tienen de residuos en un corto plazo, por ejemplo, en Italia, se delimitaron áreas de disposición de los residuos de hospitales los cuales debían ser llevados a bolsas de gran tamaño y colocadas en las áreas delimitadas cubriéndolas con una capa para evitar la dispersión del virus en el aire (Vitone YJ et al. (2021)).

Los vertederos durante la pandemia los residuos sólidos cambiaron su tipo y composición al ser afectados por un nuevo virus debido a que las personas tiraron los desechos que tuvieron contacto con el SARS-CoV-2 en lugares aleatorios sin clasificación alguna. Estos cambios también afectan los procesos de degradación de los desechos por lo que es necesario evaluar nuevamente si estos no afectarían las barreras de contención que aíslan los productos provenientes de la descomposición.

La incineración de los desechos de hospitales y cualquier centro de salud que atienden a personas con COVID-19, también genera un problema porque las cenizas volantes y de fondo



producidas durante el proceso se hace necesario eliminarlas. Según Wang et al., (2018) en China como opción de tratamiento, incineran los desechos de hospitales que forman parte de materias primas, quemarlo a altas temperaturas para formar *Clinker* que, agregando yeso y pulverizándolo en partículas de 50 micras, se forma el cemento Portland de uso ordinario.

Otro problema generado, es la presencia del virus en las aguas residuales, la correcta gestión de los lixiviados generados y la escorrentía superficial en las áreas de almacenamiento de los residuos contaminados con el SARS-CoV-2. Estos se pueden remediar mediante una aplicación de un revestimiento para los sitios donde se disponen los residuos de geomembranas de polietileno de alta densidad acompañado de sistemas para detectar las fugas que permitan recolectar los lixiviados (Mao et al., 2020).

La ingeniería civil cumple un papel fundamental durante la pandemia ya que garantizar el buen funcionamiento de cada infraestructura cuando los deben estar dentro de casa, que los suministros de agua estén limpios y que puedan proveer a cada vivienda un buen servicio ya que si esto no sucede, las comunidades se tendrían que empezar a movilizar y a aglomerar lo cual no es lo recomendable en una época de pandemia, también pasa con los sistemas de gestión de desechos sólidos y su correcta eliminación o (Johnston y O'Kelly, 2016).

Durante la pandemia, se hizo necesario desarrollar cimientos sin utilizar equipos especializados para hacer frente a la pandemia como construir centros de salud en tiempo récord, pero como es sabido, el cemento Portland que es el aglutinante usado mundialmente, pero este



necesita tener un tiempo de curado de por lo menos 2 semanas y es necesario conseguir un sustituto para enfrentar este problema. El plástico se presenta como un sustituto muy bueno, debido a que al calentar los desechos provenientes de este (polietileno y polipropileno) se derriten y pueden ser mezclados con tierra creando ladrillos que se endurecen en poco tiempo y proporcionan una alta resistencia. (Vitone YJ et al. (2021)).



Ilustración 4: Ladrillos hechos de la mezcla de plástico fundido con arena y arcilla. (Vitone YJ et al. 2021).

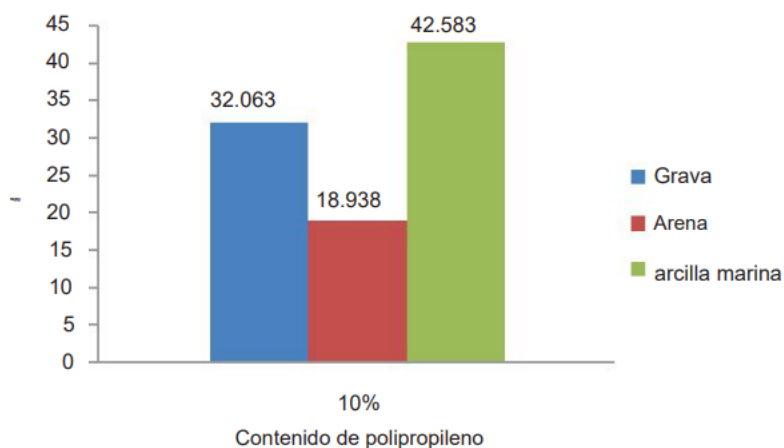


Ilustración 5: Resistencia a la compresión de grava, arena y arcilla mezclada con plástico fundido. (Vitone YJ et al. 2021).

También existe un método de cimentación que es el anclaje granular propuesto por O'Kelly, en 2014 y Sivakumar et al., 2013 el cual consiste en reemplazar los cimientos del suelo de hormigón para resistir las fuerzas de levantamiento y mejorar el terreno, tiene un tiempo de instalación muy rápido el cual sirve para anclar estructuras de carpas para hacer hospitales de campaña de ser necesario.



5. GEOTECNIA AMBIENTAL Y TRANSPORTE EN LA INGENIERÍA CIVIL.

La focalización que tiene la geotecnia ambiental en el sector del transporte se centra en la eficiencia de recursos naturales en la conformación de vías donde la generación de esta sea: económica en costos y consumo energético, disminuya el uso de suelo y la explotación de canteras (Vaníček, Jirásko, & Vaníčekb, 2017) . A su vez que sea más reconocible o predecible la varianza del deterioro y tiempo de vida de la vía en comparación con conformaciones más comunes (Bennet, y otros, 2015).

5.1 Uso de residuos de quema de carbón en la ingeniería civil

Consecuentemente cuando hablamos de gran volumen de población humana, nos referimos también a altos niveles de contaminación y residuos, lo que nos obliga a que, si queremos alargar nuestro tiempo de permanencia en el planeta, se deban reutilizar estos residuos (Jirásko, 2017), ¿pero que materiales pueden ser idóneos para el uso geotécnico-ambiental? .

Pueden ser muchos los elementos usados para esta tarea, pero al hablar de un bajo consumo de energía para hacer viable su uso debemos dividirlos en dos tipos de elementos:

- Sin mejora: aquellos materiales que pueden ser utilizados sin tratamiento alguno como los neumáticos en los muros intercalados para reforzar pobremente un terreno.



- Con mejora: aquellos materiales que requieren un tratamiento previo a su uso como la conversión de materiales grandes como llantas a viruta para su uso como aditivo.

El uso de recursos para la conformación de vías se sectoriza en aquellos desechos industriales que no tienen forma de ser utilizados o reciclados de manera que conserve su impacto en aporte a la industria o de plano sean desechados y causen alto impacto al medio ambiente como lo son las cenizas voladas (residuos de la incineración de carbón para la generación de energía en plantas eléctricas), que puedan complementar o intercambiar elementos constitutivos. Hasta el momento el uso de materiales reciclados como las cenizas voladas debe hacerse en lugares de nivel freático bajo con poca humedad, o estas capas de cenizas deberán estar cubiertas con una capa de limos que las impermeabilicen ya que estas tienden a ser contaminantes bastante fuertes de fuentes de agua por lo que se hace menester su separación por medio del suelo fino compactado (Vaníček M. , 2008).

La aplicación práctica de estas cenizas se da con mayor frecuencia en la conformación de capas de tipo ´sándwich construcción´ que consiste en el intercale de materiales entre suelos finos y cenizas para conformar la capa base del pavimento. (Vaníček M. , 2008), poca generación de asentamientos y estabilidad, a su vez que acelera el proceso de consolidación del terraplén; sin embargo, este material al ser constituido de partículas sumamente finas tiene baja densidad volumétrica por lo que termina siendo susceptible a la erosión y por esto mismo las cenizas



volantes tienen su uso restringido a pendientes (Vodička, Výborný, Hanzlová, & Vytlačilová, 2009).

Para el uso de estas cenizas en la construcción estas deben ser sometidas a un tipo de mejoramiento ya que en su forma original este compuesto contiene elementos que generan degradación en el hormigón razón por la que deben ser desulfuradas antes de su uso (Vodička, Výborný, Hanzlová, & Vytlačilová, 2009), los tratamientos más comunes son:

- Lavado en cal húmeda: en este proceso se mezcla cal molida, agua y el gas de combustión de donde provienen las cenizas dando como producto resultante escoria, ceniza y yeso energético.
- Quema de fluidos: para este proceso se mezcla carbón triturado con la piedra caliza y proceden a ser incinerados hasta generar las cenizas dando como resultado altos niveles de CaO entre residuos inutilizables y gases residuos.



Ilustración 6: Disposición y compactación de ceniza estabilizada en aplicación húmeda. Republica Checa, 2016 (Vaniček, Jiráskoa, & Vaničekb, 2017).



El resultado de ambos procesos son cenizas con alto potencial de endurecimiento que pueden ser utilizados directamente en obras constructivas o como agregados en mezclas de concreto y cal. A continuación, podemos apreciar la forma de aplicación de las cenizas en obras de transporte (Vaniček, 2006):

Las cenizas pasan por un proceso de humedecimiento y mezcla con aditivos y posteriormente es vertida de forma húmeda en la zona de aplicación, como siguiente paso se seca y compacta dejando una capa oscura sobre la vía. Una contra de esta capa es su fragilidad, por ello se recomienda el uso de estas cenizas junto con microfibras que aporten flexibilidad y resistencia a la capa conformada (Vodička, Výborný, Hanzlová, & Vytlačilová, 2009).



Ilustración 7: *Diferentes tipos de fibra usados (marcas) (Vaniček, Jiráskoa, & Vaničekb, 2017).*



5.2 Uso de material triturado

Con respecto a la construcción con materiales de demolición cabe aclarar el uso solo de escombros inertes o inorgánicos que no tiendan a la descomposición con respecto al tiempo como lo es la madera, únicamente se aprueba el uso de hormigón, ladrillos y cerámica siempre y cuando todos estos cuenten con buena calidad (referido a ladrillos de gran resistencia, al igual que la cerámica y hormigón) (Lidmila, 2011). Para el uso de los anteriores materiales se recomienda la trituración y combinación, posteriormente su clasificación granulométrica ya que estos tienden a tener o conformar propiedades similares a la del hormigón común.



Ilustración 8: *Hormigón y ladrillo triturado (Vaniček, Jirásko, & Vaničekb, 2017)*



Se recomienda el uso de esta amalgama para (Lidmila, 2011):

- El refuerzo de terraplenes con capas horizontales o refuerzo de suelos geo sintéticos (es decir complementados con materiales ajenos al suelo natural).
- Refuerzo de diques que se tienden a rebosar para disminuir la energía de flujo.
- Calzadas: ya sean de alta calidad (siendo parte de las capas inferiores a la carpeta) o baja calidad donde se utiliza únicamente en la superficie como en ciclorrutas.



Ilustración 9: Modelo de dique reforzado antes y después del desborde (Vaniček, Jirásko, & Vaniček, 2017)



A continuación, podemos evidenciar la importancia de las microfibras presentes en estos agregados generados de los desperdicios, observemos su comportamiento con diferentes porcentajes de fibra (Vaníček, Jirásko, & Vaníček, 2017).

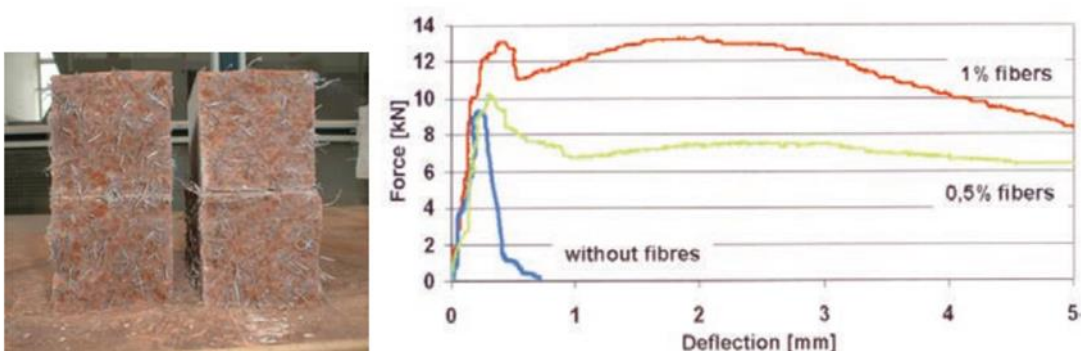


Ilustración 10: Influencia del porcentaje de fibra en la mezcla reciclada (Vaníček, Jirásko, & Vaníček, 2017).



5.3 Recuperación de suelos por derrames en vías.

Los derrames generados por accidente en las vías o por fugas en oleoductos son los que generalmente más daño genera en el medio ambiente a su vez que representan un elevado costo de perdidas, recuperación y remediación del suelo (Verma, Bhargava, & Pruthi, 2006) tanto para empresas como para la comunidad ya que en ocasiones estos derrames se generan en cercanías de suelos destinados a producción de tipo agrícolas o ganaderas lo que genera un marcado impacto económico social (Gong , Peijun, Wilke., & Kassem, 2008).

Según el Decreto 050 del 2018 en su Artículo 2.2.3.3.4.14 Plan de Contingencia para el Manejo de Derrames Hidrocarburos ordena primeramente la identificación del medio físico donde se presenta el derrame y posteriormente empezar las labores de contención del líquido. Cuando no se conoce el contaminante ni la fecha del derrame se procede a generar el estudio geotécnico de la zona en pro de (Arguelles, 1991) ; al mismo tiempo dependiendo el volumen vertido en la zona se aconseja la creación de fosas impermeabilizadas con geotextiles para focalizar, almacenar y favorecer la reconexión del líquido contaminante. Es menester aclarar que del 100% del material derramado solo se logra la correcta extracción de entre 60%-70%, mientras que entre un 5%-10% es transportado por acuíferos y son imposibles de recolectar (NOM-138-SEMARNAT/SSA1, 2012).



Ilustración 11: *Suelo con altos niveles de hidrocarburo. (UNAM, 2012).*

Los estudios e informes más solicitados para conocer las condiciones del suelo contaminado según (NOM-138-SEMARNAT/SSA1, 2012) son:

- Estratigrafía y nivel piezométrico: en este estudio obtenemos la forma de los estratos que conforman el área contaminada y nos ayuda a dimensionar la profundidad de alcance del contaminante con respecto a la superficie.
- Clasificación SUCS: detalla la estratigrafía y define las zonas de mayor propagación del contaminante.



- Permeabilidad y porosidad: con esta información podemos estimar el volumen de contaminante infiltrado desarrollado durante el derrame. Según estos resultados se puede sugerir el bioventeo.

Una vez se obtienen los resultados del estudio de caracterización del suelo se procede a decidir si se tiene que hacer una remoción del suelo contaminado o se plantea generar una recuperación in situ, si es el caso de la recuperación local se procede a decidir el siguiente estudio para reconocer la magnitud y alcance del daño ambiental (NOM-138-SEMARNAT/SSA1, 2012) con sondeos en la zona afectada donde el número de sondeos dependerá del área y posteriormente se calcula el distanciamiento y profundidad de estos sondeos con el tipo de contaminante derramado.

Área (ha)	Puntos de muestreo	Puntos de muestreo recomendados		
	NOM-138	(Arena)	(Arena Limosa)	(Arcilla)
Hasta 0.1	4	6	6	2
0.2	8	10	10	4
0.3	12	14	14	6
0.4	14	16	15	7
0.5	15	17	16	8
0.6	16	18	17	8
0.7	17	20	18	9
0.8	18	22	19	9
0.9	19	23	20	10
1.0	20	25	22	10

Ilustración 12: Número de muestreos según el área afectada (García & Pérez, 2010).



Tipo de suelo	Hidrocarburo	Profundidad muestreo(m)	Muestras/Punto
Arena	Combustóleo	12.0	1@3m
	Diesel	15.0	1@3m
	Gasolina	20.0	1@2m
Arena Limosa	Combustóleo	9.0	1@3m
	Diesel	9.0	1@3m
	Gasolina	12.0	1@3m
Arcilla	Combustóleo	4.0	1@2m
	Diesel	4.0	1@2m
	Gasolina	6.0	1@2m

Ilustración 13: Distanciamiento recomendado según el contaminante (García & Pérez, 2010).

Una vez reconocido el alcance de daño se procede a recuperar el terreno de dos formas:

- PCA (pozo a cielo abierto): si el derrame fue de hidrocarburo volátil como lo es la gasolina se plantea un método económico de eliminación que consiste en la adición de microorganismos cuyo metabolismo se basa en el consumo de estos derivados del petróleo (los residuales que no son capaces de desaparecer por evaporación) y la apertura de posos para que el suelo para que las capas más profundas también reciban estos microorganismos y evapore el contaminante presente a esa profundidad (proceso mayormente usado en suelos de grano fino).
- Bioventeo: es el proceso de degradación de hidrocarburos por medio de inyección de microorganismos y oxígeno con el uso de bombas de presión con posos de inyección donde dependiendo del tipo del contaminante y tipo de suelo a tratar cada inyección de aire puede tener un radio de acción de 10m en promedio. La inyección de oxígeno ayuda a generar la evaporación del fluido a medida que surge de oxígeno a las bacterias



SC-CER96940





encargadas de consumir el contaminante. (Recomendado para suelos de grano más grueso).

- Desorción térmica: como metodología no convencional ex situ para suelos contaminados tenemos la desorción térmica que consiste en el transporte del suelo afectado una banda transportadora que gradualmente lleva el suelo por un tambor rotatorio y finalmente a una cámara de calor. La función del tambor es mezclar y separa el suelo continuamente para evitar que el contaminante se concentre y proteja con el suelo a su vez que es calentado por la cámara evaporando el hidrocarburo gradualmente con temperaturas desde 90°-300°c por un tiempo de 15-20 min, estos parámetros dependerán del tipo de contaminante, su concentración en la mezcla, el tipo de suelo y la humedad que albergue al momento del tratamiento. Los gases residuales pasan igualmente por un quemador y por un proceso de lavado para poder ser liberados a la atmosfera (Aracil, Maruri, Vallés, Martínez, & Porres, 2003).



SC-CER96940



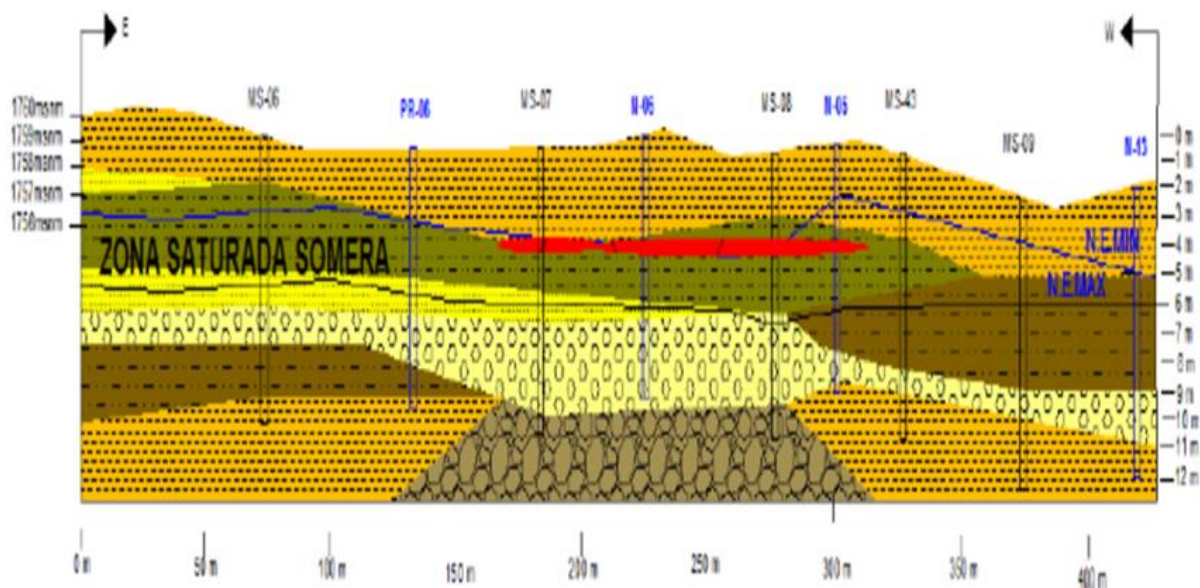


Ilustración 14: Estratigrafía y modelo conceptual (Torres, 2019)

Indiferente del método usado para la recuperación del suelo los exámenes del terreno se deben continuar haciendo de forma periódica para dar seguimiento al estado del suelo y conocer su avance en cuanto a eliminación de los agentes externos para que en llegado caso de que la propuesta planteada de saneamiento del entorno inicialmente no cumpla con los parámetros esperados de mejora se pueda cambiar la metodología a tiempo sin comprometer presupuesto, tiempo y recursos valiosos para la pronta recuperación del suelo afectado. Una vez terminado cualquier método de saneamiento del suelo es menester suministrar a éste microorganismos, abundante agua y fertilizante que ayude a la continuación del uso del suelo así este puede seguir con su restauración natural con respecto al tiempo.



SC-CER96940





6. LA GEOTECNIA AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y DEPÓSITOS.

6.1 Disposición final de residuos peligrosos.

Debido a lo perdurables y peligrosos que tienden a ser ciertos desperdicios para la salud del ser humano y del ambiente se aconseja que estos sean dispuestos acomodados y sellados para su almacenamiento en una fosa en el sub suelo en llegado caso que estos por sus propiedades no puedan ser desmantelados, reutilizados o destruidos de forma controlada. De esta manera se da una solución a largo plazo para que puedan tener un aislamiento completo sin que haya interacción con estos elementos así se les da tiempo para que pierdan sus propiedades nocivas a su vez que se degradan y se mantienen alejadas de interacción humana. Estas fosas bien pueden ser compuesta netamente de capas de suelo compactados o complementos entre suelo, plásticos y concreto. El uso de estos se tendrá en cuenta según el tipo de desperdicio que se pretenda aislar.



SC-CER96940





Para esto último hay que entender que sin importar su aislamiento existen elementos que no deben almacenarse juntos debido a reacciones violentas o corrosivas que en un espacio confinado puede debilitar tanto el suelo como su sellante estructural.

Ácidos	Cianuros
Sustancias combustibles o inflamables	Oxidantes
Ácidos fuertes	Bases fuertes
Ácidos	Agua
Solventes	Sustancias corrosivas (ácidas básicas)
Líquidos inflamables	Fuentes de ignición
Sustancias fuertemente corrosivas (ácidas y básicas)	Aleaciones de aluminio, magnesio y zinc

Ilustración 15: Pares de sustancias comunes incompatibles (León, 2004).

Para la generación de depósitos o rellenos sanitarios especializados para ciertos tipos de materiales debemos tener en cuenta que su almacenamiento debe cumplir ciertos parámetros de protección donde se restrinjan actividades que puedan dar a pie a una ignición, fuga o reacción que ponga en peligro tanto al personal que allí trabaja como al medio ambiente (NOM-055-ECOU, 1993).



SC-CER96940





Las medidas más ampliamente usadas para evitar la alteración de su disposición son el uso de amplias áreas con entradas, pasillos y delimitaciones para la entrada de vehículos tanto para disponer de ayuda como para evacuar y desechar elementos (Jiménez & Cisneros, 2000). Debe contar obligatoriamente con un muro de contención junto con bases y paredes cubiertas con capas de geomembrana que evite el contacto directo del suelo con el material.

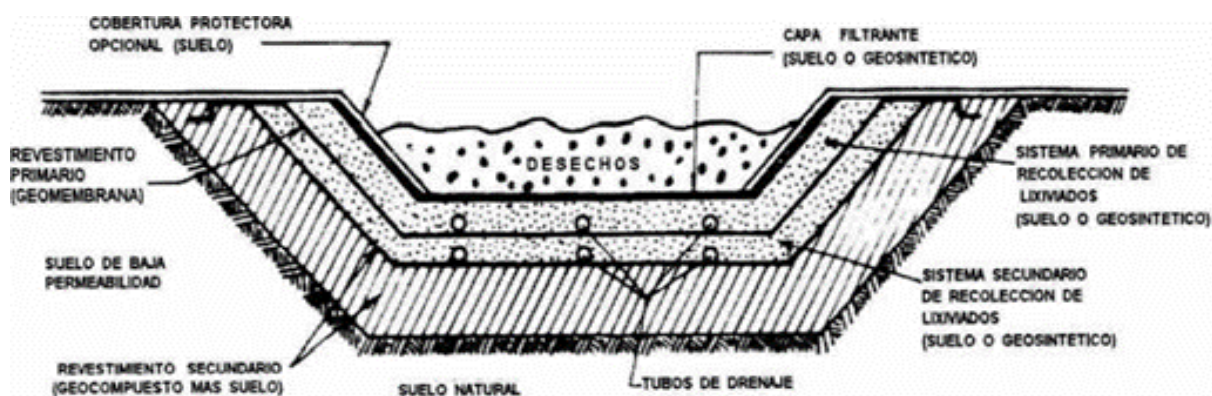


Ilustración 16: *Composición general de rellenos sanitarios (León, 2004)*

Las bases de suelo deben estar conformadas por arcillas y limos impermeables que en caso de fuga restrinjan el paso del material a través del subsuelo contaminando el medio biótico donde se dispone, se recomienda que el vertedero se encuentre bajo techo y bien ventilado sin que permita mucho la entrada de los rayos del sol directamente sobre los contenedores o las sustancias (Jiménez & Cisneros, 2000). En el caso que los escombros produzcan lixiviados por la humedad del



ambiente se recomienda la adición de un sistema de drenaje dentro del vertedero para evitar que partículas residuales abandonen el sistema de contención. (Boscoy, 2008):

- ~ Inspección visual, para la identificación de fisuras, cavidades, erosiones, liquido percolado extraído por el sistema de evacuación.
- ~ Análisis de laboratorio de muestras de pozos de control o monitoreo. En cuanto a monitoreo geotécnico, la literatura enfatiza la necesidad de:
- ~ Controles de desplazamientos tanto horizontales como verticales, mediante marcos superficiales, placas e inclinómetros, como alternativa para el control de retracciones y desplazamientos.
- ~ Control de presiones generadas por gases al interior mediante piezómetros.

Las anteriores recomendaciones apuntan a un mismo fin y es evitar la infiltración de los contaminantes en cualquiera de los estados materiales, esto obedece tanto a los elementos de seguridad pertenecientes a las instalaciones como al suelo en el que se pretende la localización y almacenamiento de los residuos. Se han dado casos en Colombia donde por factores externos o internos suceden desprendimientos de taludes, movimientos de tierra o desborde de lixiviados en la concentración, muchas veces por falta de monitoreo y mala planeación del sitio. Un ejemplo conocido acá en Colombia fue el deslizamiento ocurrido en el relleno doña Juana ubicado en Bogotá el sábado 27 de septiembre del 97 donde un volumen de suelo y desechos de alrededor de 100 mil toneladas se deslizaron casi 1,2 kilómetros por el talud expulsando altas concentraciones



de lixiviados, desperdicios sólidos y gases que estuvieron presentes casi 8 meses después del deslizamiento perjudicando la vida de las personas ubicadas sobre el barrio Tunjuelito en el sur de la ciudad. Tras el paso del tiempo se han logrado identificar algunas razones por la cual sucedió este deslizamiento (Collazos, 1998).

- Un ingreso de desechos tanto sólidos como líquidos mayores de lo esperado y mayor al volumen que podía este evacuar lo cual aumento las presiones internas del relleno dejando sin soporte sólido todo el material almacenado.
- Múltiples obstrucciones en el sistema de evacuación de gases y líquidos los cuales se acumularon conjuntamente evitando el flujo de ambos por los canales debidos.
- Errores de diseño al no tener en cuenta la presión hidrostática generada al compactar los residuos y la poca contención que habría entre los muros laterales los cuales dejarían una capa sumamente deslizante como la celda para generar fricción y evitar el movimiento (Collazos, 1998).

A pesar que este no haya influido en el ejemplo anterior es menester mencionar que en la mayoría de rellenos sanitarios donde se presentan estos deslizamientos la pendiente sumamente pronunciada es un factor constante por lo que se recomienda la proporción 1V:4H en el diseño de los vertederos para asegurar la estabilidad de estos (Colomer, Gallardo, & Bovea, 2009). Las proporciones Verticales y Horizontales distribuidas en 1:4 aportan matemáticamente una pendiente estable de 14° el cual usado en cálculos con un factor de seguridad de 1.41 otorgan



estabilidad al relleno incluso estando en condiciones saturadas con alturas de hasta 60m (Dinni, Ferraro, & Gasaly, 2007).cabe mencionar que estos parámetros son mayormente usados en vertederos donde sus desechos a pesar de ser sumamente tóxicos no representan un peligro mayor como lo serian elementos radiactivos, desechos hospitalarios, o desechos industriales altamente corrosivos.

6.2 Estabilización de taludes con revegetación

Siendo la estabilidad en los taludes una parte fundamental de las vías en biomas montañosos, es menester asegurar la estabilidad de estos para contribuir al flujo de tránsito constante, prevenir, costos de reparación en llegado caso el movimiento de tierra presentado sea de gran magnitud, mitigar costos por mantenimiento y aún más importantes pérdidas humanas. (Reyes, 2019). siendo un poco más específicos podríamos hablar del tipo de suelo que compone el talud, la pendiente generada, el volumen y el tipo de vehículos que transitaran por la vía. Para la mejor contemplación de estos elementos influyentes en la ladera (Rodriguez, 2006) aporta la siguiente tabla.



Factores Internos	Geológicos
	Geomorfológicos
	Geotécnicos
	Vegetación
Factores externos	Climatológicos
	Sísmicos
	Antropogénicos

Ilustración 17: Factores inherentes a la estabilidad de taludes (Rodríguez, 2006).

Por el lado de la geotecnia ambiental se propone el uso de geomallas compuestas de material orgánico, plástico o mixto junto con una capa de vegetación que aporte estabilidad según sus características biológicas, estas características de las que hablamos son la dureza y penetración de las raíces, así como su adaptación al ambiente, velocidad de crecimiento y que no represente una presencia invasiva para el ecosistema donde se pretende su uso (Arauzo, 2020). Cabe mencionar que el uso de esta alternativa solo debe hacerse en los casos que el suelo pretenda cierto nivel de estabilidad y su pendiente no sea pronunciada para el tipo de suelo que compone el talud, si este es el caso debe optarse por métodos menos ecológicos, pero más seguros para el proyecto. Según (Arauzo, 2020) La función principal de la vegetación añadida o revegetación es la de disminuir la erosión y arrastre de material en la superficie ya que es la principal razón por la que



se degrada la pendiente del talud incluyendo los factores como lluvia y viento. A continuación, un modelo hecho en el software Geo5 genera las zonas críticas a movimientos de tierra en un talud.

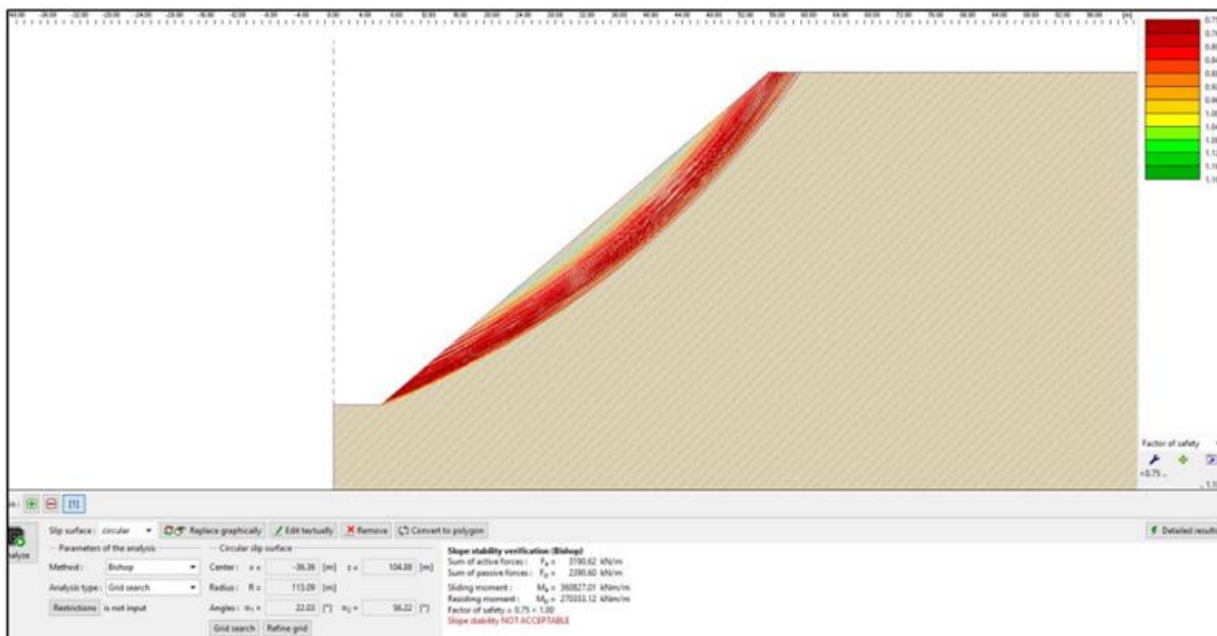


Ilustración 18: Diseño del talud en software Geo5, (Arauzo, 2020)

La estabilización del terreno depende generalmente de la localización del país y la climatología sin embargo para casi todo Latinoamérica se recomienda el uso de la planta Stipa Ichu (Arauzo, 2020), se trata de un tipo de pasto común de la zona Andina el cual tiene características biológicas que favorecen su uso en la labor de protección a la cara externa y estabilización del talud como lo es su rápido crecimiento, su adaptabilidad a climas secos, sus raíces largas las cuales aportan un gran agarre en el suelo, a parte de esas características el uso de



vegetación aporta otras características como la retención de humedad por parte de la planta lo que contribuye a niveles más estables de humedad en el suelo lo que evita su saturación y posterior movimiento (Arauzo, 2020).

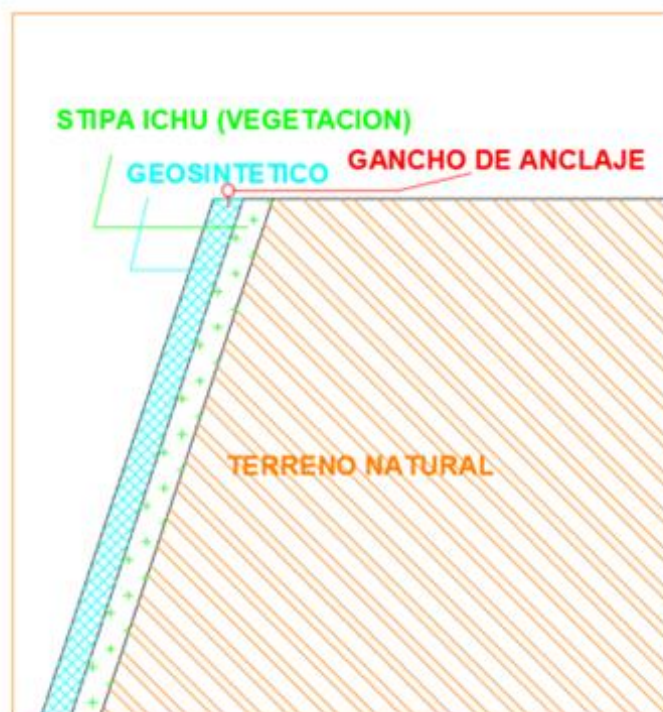


Ilustración 19: Conformación del talud estabilizado, (Arauzo, 2020).

En la anterior imagen podemos apreciar la conformación en capas de la estabilización del talud contando con la capa de vegetación y una geomembrana que puede ser biodegradable para ir fusionándose con la capa orgánica del terreno o una geomembrana más común plástica. Este método requiere de:



- Anclaje superior: debe hacerse una apertura longitudinal en la parte más alta del talud donde se agregarán datos o una viga que sostendrá la geomembrana.
- Suelo: para la inserción de la especie vegetal se puede agregar una pequeña capa orgánica de sólidos si el suelo presente no tiene las propiedades suficientes para sostener y alimentar la vegetación.
- Vegetación: esta puede ser introducida en pequeños puntos para que poco a poco se vaya esparciendo por la cara del talud o puede ser adicionada al terreno en forma de semilla para su posterior roseado y observación para asegurar la correcta introducción.
- Geomembrana esta se adiciona antes o después de la inserción de la capa vegetal y proporciona mayor estabilidad, así como atrapa los trozos de roca que van desprendiéndose durante el periodo de estabilización.
- Grapas: son elementos de acero que se encargan de sostener y mantener la geomembrana adherida al suelo.



SC-CER96940





Ilustración 20: Anclajes de geomalla (Arauzo, 2020)

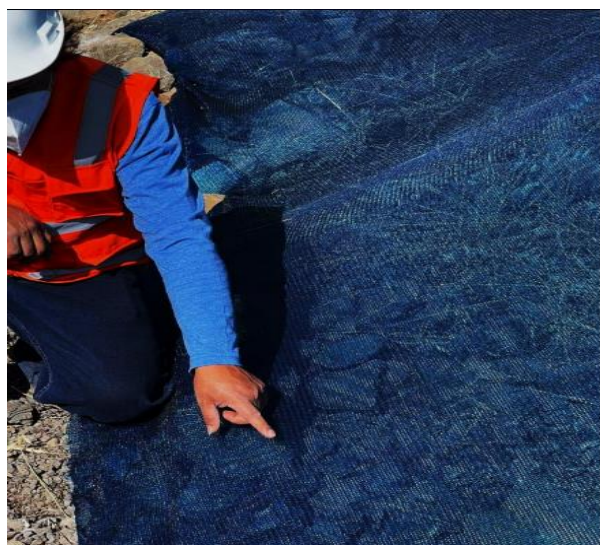


Ilustración 21: Contención de rocas por la geomalla (Arauzo, 2020)





CONCLUSIONES.

La Geotecnia Ambiental ha avanzado y tomado importancia de manera muy rápida debido a que los problemas medio ambientales han ido en constante crecimiento a lo largo de los años. Por esto, en las obras civiles es necesario aplicar la geotecnia ambiental con estudios muy minuciosos y proponiendo soluciones a posibles problemas que se puedan presentar promoviendo el desarrollo sostenible evitando que el cambio climático no siga agravándose.

Es sumamente importante que las personas que están relacionadas con el tema de geotecnia, de obras civiles e incluso del medio ambiente, tomen conciencia de que preservar el medio ambiente es lo más importante que podemos hacer por nosotros y por las siguientes generaciones ya que la contaminación aumenta desmesuradamente y aportar todo lo necesario para frenarla es lo que se debería hacer.

El sistema de indicadores para la geotecnia ambiental aplicada en obras presentado es muy flexible debido a que están inspirados en los indicadores y los proyectos existentes, esta flexibilidad aporta que puedan lograr una vinculación con los marcos de gestión existentes y los que se puedan realizar en el futuro. Este sistema se aparte de ser usado en la práctica, también puede ser usado como una herramienta de aprendizaje debido a su manejo y su agrupación en indicadores independientes.



Las enfermedades patológicas de los seres humanos también tienen que ver de alguna u otra manera con la Geotecnia Ambiental (como la problemática de la pandemia del COVID-19) por eso, aplicar habilidades y conocimientos de los profesionales necesarios para contribuir de manera positiva en esta problemática, como lo son la aplicación de revestimientos para evitar la contaminación por lixiviados cargados de patógenos infecciosos en los rellenos sanitarios o incluso las maneras de agilizar las obras civiles proponiendo métodos innovadores como el uso de plástico fundido.

El uso de la revegetación en taludes corresponde a un uso en laderas escarpadas que son sumamente propensas a la erosión por lluvia, viento o el movimiento descendente de las rocas por la pendiente. este método no debe ser usado en aquellos taludes cuya estabilidad se ve comprometida en tiempos de lluvia, durante movimientos telúricos o presenten fallas que predispongan el movimiento de tierra en el talud, se recomienda que en los anteriores casos se lleven a cabo procesos de mayor margen de seguridad.

El factor que más incide en el desborde o la pérdida de contención en rellenos sanitarios es la capacidad de captación de lixiviados, puesto que la aparición de presiones hidrostáticas formadas por líquidos en la base del relleno genera un desbalance de fuerzas que ocasiona que por la pendiente de la excavación se focalicen las presiones en los bordes de contención. Por este motivo es fundamental en el funcionamiento de los rellenos sanitarios que se monitorice la entrada de residuos y el porcentaje de humedad de estos, a su vez se cuente con un sistema de drenaje lo



suficientemente amplio en llegado caso aumente la humedad en el relleno y se genere un volumen de lixiviados mayor de lo esperado.

El uso de micro fibras en la capa de cenizas volantes se da solo cuando el flujo vehicular y el tonelaje de estos lo amerita puesto que estas fibras aportan flexibilidad y resistencia para altas cargas (recordemos que se usa en pavimentos flexibles), en caso que no se usen estas fibras es claro indicador que va a ser usado en los costados de las vías para la generación de ciclorrutas o espacios peatonales.

El hecho de la existencia de múltiples especies de microorganismos que tengan la capacidad de descomponer o alimentarse de sustancias contaminantes prececeras en los suelos, abre la ventana al uso de diferentes tipos de bacterias para la recuperación de suelos que hayan sido alterados no solo por hidrocarburos sino por elementos que comúnmente ocupan los rellenos sanitarios como plásticos, o elementos “biodegradables” sumamente resistentes al paso de las décadas como el cartón y el papel periódico.

El uso de concreto triturado como agregado en la mezcla de hormigón tiene un principal problema y es la procedencia del mismo, puesto que son pocas las obras que son demolidas las cuales tienen altos estándares de calidad en resistencia por lo que es más viable el uso de ladrillo triturado el cual es más abundante como desecho que el mismo concreto de alta calidad, cabe aclarar que el uso de este concreto triturado debe ser el de sustituir en porcentaje el uso de material granular grueso extraído de canteras.



En la compilación anteriormente tratada, se aglomeraron temas respecto a la contaminación de suelos, del aire y de las fuentes hídricas que se pueden solucionar aplicando métodos geotécnicos ambientales innovadores que propongan verdaderas maneras de hacer que la humanidad siga adelante sobrepasando todos los problemas medioambientales que se presentan ya sea por derrames de combustibles productos de recursos fósiles o por los residuos sólidos contaminados con virus productos de centros de salud.



BIBLIOGRAFÍA

García, J., Pérez, M., Gonzales, E. & Hernández, C. (2019). La geotecnia ambiental como base estratégica del desarrollo de estudios de caracterización y remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

Vaniček, I., Jirásko, D. & Vaniček, M. (2017). Transportation and Environmental Geotechnics.

Soria, F. & Rodríguez, A. (2019). Lecciones aprendidas por casos de deslizamientos ocurridos en rellenos sanitarios municipales, a partir de la recopilación de experiencias ocurridas en Latinoamérica.

León, J. (2004). Geotecnia Ambiental.

Arauzo, J. & Tumialan, I. (2022). Coberturas mixtas en base a geomalla y vegetación para la estabilización de taludes en una carretera a nivel de afirmado.

Sánchez, E. (2014). Caso de estudio: gerencia de proyectos de construcción sostenible en naos: campus empresarial-nqs-101.

Tang CS , Paleologos EK , Vitone YJ et al. (2021) Geotecnia de residuos ambiental: retos y oportunidades en el mundo post-Covid-19. Geotecnia ambiental 8(3): 172–192, <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00054>



SC-CER96940





Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias. Geotecnia ambiental.
Exploración Geotécnica de obras

León, José J. (2004) Tesis de grado: Geotecnia ambiental.

Buendía, M. (2004). El medioambiente como narrativa global: definición de problemas medioambientales y retos para las políticas públicas.

Jefferson, I., Hunt, D. V., Birchall, C. A., & Rogers, C. D. (2007, June). Sustainability indicators for environmental geotechnics. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 160, No. 2, pp. 57-78). Thomas Telford Ltd.

J.Vodička, J. Výborný, H. Hanzlová, V. Vytačilová. (2009). Utilization of fibre-concrete in earth structures. (In Czech) Sustainable construction.

Onyelowe, K. C. (2017). Gestión de residuos sólidos (SWM) en Nigeria y su utilización en la geotecnia ambiental como una innovación de servicio empresarial (ESI) para el desarrollo sostenible.

M. Lidmila. (2011). Long-term behaviour of the layer of fly ash stabilizer in the track bed construction. (In Czech). Waste utilization, recycled materials in building industry



Roque, A. J., Paleologos, E. K., O’Kelly, B. C., Tang, A. M., Reddy, K. R., Vitone, C., ... & Singh, D. N. (2021). Sustainable environmental geotechnics practices for a green economy. *Environmental Geotechnics*, 9(2), 68-84

Francisca, F. M. (2011). About the future of geotechnical engineering: a view from South America. In *Proceedings of the 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference (14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)*, Paper (Vol. 1211).

Johnston, P. M., & O’Kelly, B. C. (2014). Importancia de la geotecnia ambiental. *Geotecnia ambiental*, 3(6), 356-358.

Torres-García, J. D. J., Pérez-Rea, M. D. L. L., Rojas González, E., & Hernández Mendoza, C. E. (2019). La geotecnia ambiental como base estratégica del desarrollo de estudios de caracterización y remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. In *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* (pp. 2510-2518). IOS Press.

O’Kelly, B. C., El-Zein, A., Liu, X., Patel, A., Fei, X., Sharma, S., ... y Singh, D. N. (2021). Microplásticos en suelos: Una perspectiva geotécnica ambiental. *Geotecnia ambiental*, 8(8), 586-618.

Iturbe-Arguelles, R. (1991). Transporte de contaminantes a través del suelo. *Simposio Geotecnia y Medio Ambiente*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México.



Flores-Puente M.A., Torres-Ortiz S y Téllez Gutierrez R. (2004). Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre. Publicación Técnica No. 257. Instituto Mexicano del Transporte. México

Gong Z., Li Peijun., B.M. Wilke., Kassem A. (2008). Effects of Vegetable Oil Residue after Soil Extraction on Physical-Chemical Properties of Sandy Soil and Plant Growth. Journal of Environmental Sciences 20, 1458-1462.

Plohl K, and Leskovsek H. (2002). Biological degradation of motor oil in water. Acta Chim. Slov., 49, 279-289.

Torres-García y Pérez-Rea, Recomendaciones Geotécnicas en la planeación de muestreos ambientales de sitios contaminados por hidrocarburos, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2010.