



UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y CONTABLES
DOCTORADO EN DESARROLLO SOSTENIBLE
LÍNEA BIOSISTEMAS INTEGRADOS



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

**ESTUDIO SOBRE LA BIOELECTROREMEDIACIÓN
COMO ALTERNATIVA BIOTECNOLÓGICA PARA LA
SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN EL
DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ**

TESIS DOCTORAL

NIZA INÉS SEPÚLVEDA ASPRILLA

DIRECTOR

JHON FREDY BETANCUR PÉREZ. PhD.

Agosto , 2019

Agradecimientos

A Dios por llevarme de la mano y permitir que este proceso doctoral fuera posible.

A mi hijo Leonardo Kamal Blandón Sepúlveda, a quien dedico esta tesis por ser esa fuente de inspiración que llegó en el momento justo renovarme las energías para luchar por mis sueños.

A mi madre Cielo Asprilla Cuesta por su compañía y por recordarme siempre que todo trabajo da resultado.

A Fabiola Murillo por su incondicionalidad y por ser esa voz de aliento cada vez que lo necesite en el transcurso del proceso de formación

A mi tía Clara Esperanza Asprilla Cuesta Q.E.P.D., quien siempre se llenó de orgullo al ver mis experimentos.

A la Doctora Alicia Ríos Hurtado Q.E.P.D., por su apoyo para la obtención de la beca en programa de formación de alto nivel de la gobernación del departamento del Chocó.

Al Doctor Jhon Fredy Betancur por sus valiosos aportes en el desarrollo de la tesis en su calidad de tutor.

Al grupo de investigación en Biotecnología Ambiental (BIOTAM) de la Universidad Tecnológica del Chocó.

Al equipo de la Corporación Ecotecnológica Ambiental “ECOTAM”.

A mis compañeros de doctorado, en especial a Margarita Pérez por su apoyo incondicional.

Y a todos esos seres de luz que se cruzaron en mi camino para guiarme cuando más lo necesité.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
1. DISEÑO TEÓRICO.....	18
1.1. Bioelectroremediación	18
1.2. Preguntas de investigación.....	19
1.3. Descripción del área problemática	19
1.4. Antecedentes investigativos	21
1.5. Justificación de la investigación.....	27
1.6.1. Objetivo general	31
1.6.2. Objetivos específicos.....	31
1.7. Categorías de análisis.....	31
1.7.1 Hipótesis	32
1.7.2. Matriz de variables	32
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	32
2.1. Contaminación ambiental.....	32
2.1.1. Tipos de contaminantes	33
2.2. Biotecnología	34
2.2.1. Biorremediación	34
2.2.2. Bioenergía.....	36
2.2.3. Bioeconomía.....	38

2.4. Biogeobatería	38
2.4.1. Baterías de suelo (<i>earth battery</i>)	41
2.5 Metodos	42
2.5.1 Método oxidación con peróxido de hidrógeno	42
2.5.2 Método Munsell.....	42
2.5.3 Método del potencial espontáneo (<i>self-potencial</i> o <i>spontaneous potential</i>)	43
2.5.4 Método Columna de Ambientes Microbianos Winogradsky	44
2.6 Teoría General de Sistemas.....	46
2.6.1 Dinamica de sistemas	46
2.7 Desarrollo sostenible	47
2.7.1 Sostenibilidad Ambiental	52
3. METODOLOGÍA.....	53
3.1. Tipo de investigación	53
3.2. Unidad de análisis	54
3.3. Población.....	54
3.4. Contexto geográfico	54
3.4 Identificación del fenómeno de Bioelectroremediación.....	57
3.5 Instrumentos	61
4. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	62
4.1 Identificación del fenómeno de la bioelectroremediación a partir del modelo de biogeobaterias.....	62
4.1.1 Identificación y elección del sitio.....	62
4.1.2 Medición in situ de corriente espontánea en sedimentos	63
4.1.3 Medición ex situ de corriente espontanea en sedimentos.....	63
4.1.4 Columna de Winogradsky	63

4.1.5 Montaje de biogeobatería	63
4.2 Diseño, construcción y comparación de dos biogeobaterias sencillas y a bajo costo: sedimentaria y sistema con plantas.	65
4.2. 1 Principio de operación de sistema biogeoelectrico	65
4.2.2 Diseño de sistemas biogeoelectricos	66
4.2.3 Sistema biogeoelectrico con sedimentos	66
4.2.4 Sistema biogeoelectrico con plantas.....	68
4.2.4. Comparación de prototipos.....	68
4.3 Analisis mediante dinámica de sistemas del fenómeno biogeoelectrico.....	69
4.4 Analisis Estadistico	69
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
5.1 Bioelectroremediación a partir del modelo de biogeobaterias construidas con sedimentos provenientes de zonas aluviales con influencia de aguas residuales.....	70
5.1.1 Actividad bioeléctrica de sustratos	73
5.1.2 Influencia de la materia orgánica (MO) en la generación de bioelectricidad a partir de sedimentos	82
5.1.3 Influencia del agua en la en la generación de bioelectricidad a partir de sedimentos.	84
5.2 Biogeobateria con dispositivo Mudwatt como Modelo para el Estudio de Fenómenos Biogeoelectricos	86
5.3 Microbioma en sedimentos y su rol ambiental.....	92
5.4 Sistemas Biogeoelectricos Artesanales a Bajo Costo: con Sedimentos y con Plantas.....	95
5.4.1 Prototipo de biogeobatería sedimentaria	96
5.4.2 Prototipo de biogeobatería con planta ornamental Dieffenbachia ssp	99
5.4.3 Comparación prototipo sedimentario y prototipo con plantas	103
5.5 Analizar la bioelectro remediación como alternativa biotecnológica	104
CONCLUSIONES	106

RECOMENDACIONES.....	108
REFERENCIAS.....	110
ANEXOS	130
Anexo 1. Análisis microbiológico realizado al agua residual proveniente del pozo séptico del bloque 8 de la universidad tecnológica del chocó utch.	130
Anexo 2. Prototipos biogeoeléctricos de referencia.....	132
Anexo 3. Calculadora de potencia microbiana mudwatt TM	136
Anexo 4. Comportamiento de voltajes en un ciclo de 13 minutos en la columna bioelectrogénica en mv. Página 102.....	137
Anexo 5. Monitoreo de biogeobateria del 24 de junio al 20 de agosto de 2018 página 93 ..	138
Anexo 6. Monitoreo de biogeobateria del 21 de agosto de 2018 al 28 de marzo de 2019 ...	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rendimientos bioeléctricos con respecto a la especie	26
Tabla 2. Prototipos biogeoeléctricos de referencia	27
Tabla 3. Matriz de variables	32
Tabla 4. Tabla de comparación Biorremediación y Electrorremediación	35
Tabla 5. Tipo de investigación con relación a los objetivos y variables	53
Tabla 6. MFC estudiadas con cultivos de bacterias puras inoculadas en corrientes de aguas residuales con sustratos apropiados.....	58
Tabla 7. Enfoque convencional versus enfoque propuesto de Bioelectroremediación.....	61
Tabla 8. Protocolo para la exploración del fenómeno de Bioelectroremediación	62
Tabla 10. Composición de sistemas biogeoeléctricos.....	65
Tabla 10 Prueba de Levene para Homogeneidad de Varianza	74
Tabla 11 Resultados de Analisis de Varianza Univariado	75
Tabla 12 Prueba de Tukey HSD.....	76
Tabla 13 Composición química de los suelos de Quibdó	78
Tabla 14. Estadística descriptiva rastreo asistemático de autopotenciales en seis puntos al azar	80
Tabla 15. Correlaciones voltajes en presencia y ausencia de materia orgánica	83
Tabla 16. Voltaje muestras secas/muestras húmedas	85
Tabla 18. Estadística descriptiva Voltaje muestras secas/muestras húmedas.....	85
Tabla 18. Potencia MudWatt (en microWatts) condiciones iniciales de arranque	88
Tabla 19. Potencia MudWatt (en microWatts) condiciones finales.....	89
Tabla 20. Potenciales microorganismos con base en la coloración de los estratos.....	93

Tabla 21. <i>Voltajes y conductividad del sedimento extraído de la biogeobatería seis meses después de su montaje con relación a un sedimento fresco durante 15 días</i>	97
Tabla 22. <i>Voltajes y conductividad del sedimento extraído de la biogeobatería versus sedimento fresco durante 15 días</i>	98
Tabla 23. <i>Correlación voltaje sedimento biogeobatería voltaje sedimento fresco</i>	98
Tabla 24. <i>Correlación conductividad sedimento biogeobatería conductividad sedimento fresco</i>	99
Tabla 25. <i>Potencial en celdas con vegetales</i>	102
Tabla 26. <i>Comparación prototipo sedimentario y prototipo con plantas</i>	103

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Escenarios representativos de zonas aluviales contaminadas por vertimientos y disposición inadecuada de residuos. A la izquierda un sector de la quebrada la Yesca (a), a la derecha zona de descarga barrio San Vicente a las orillas del río Atrato.	20
<i>Figura 2.</i> (a) Ecosistema aluvial. Zona de influencia orillas río Atrato Quibdó- Chocó y (b) Zona aluvial influenciada por la quebrada la Yesca, barrio Buenos Aires Quibdó- Chocó.	29
<i>Figura 3.</i> Dos posibles modelos de transferencia de electrones en una pluma contaminante. a) modelo I, la presencia de minerales facilita el envío electrónico. b) En el modelo II las bacterias se conectan por conducción del pili	40
<i>Figura 4.</i> Bateria de tierra Patente No. 155,209, fechada el 22 de septiembre de 1874.....	41
<i>Figura 5.</i> Método Munsell para clasificación de suelos	43
<i>Figura 6.</i> Columna de Winogradsky	45
<i>Figura 7.</i> Procedimiento general de la investigación, de acuerdo a los ejes en los que se fundamenta el estudio de la bioelectro remediación.....	56
<i>Figura 8.</i> (a) Computador, (b) medidor de temperatura y humedad ambiental, (c) multímetro, (d) microscopio, (e) estufa, (f) medidor de humedad suelo , (g) medidor de humedad ambiental (f) Medidor de humedad bajo alto, temperatura °c Y F, Ph, luz alto o bajo para	61
<i>Figura 9.</i> Modelo de tanque para la generación de señales (SP).....	64
<i>Figura 10.</i> Celda experimental para la generación de señales de autopotencia (SP) con el sedimento configurada con electrodos de grafito en posición horizontal estática.....	64
<i>Figura 11.</i> Modelo de pila de tierra multicelular (earth battery).	65
<i>Figura 12.</i> Se muestra en la imagen el diseño a escala artesanal de dos prototipos biogeoelectrónicos que funcional de manera similar a las baterías de tierra. (a) Prototipo sedimentario, (b) prototipo con plantas	66
<i>Figura 13.</i> (a) Medición de 20 cm de profundidad para recolección de sedimentos, (b) recipientes para la recolección, (c) recolección de sedimentos en zonas vegetadas y (d) tamizaje de sedimento seco.	67

<i>Figura 14.</i> Placa de plástico para el montaje de la biogeobatería con 20 cavidades (a) configuración de electrodos en serie y operación de llenado con el sedimento proveniente de zona aluvial con influencia de aguas residuales (b)	68
<i>Figura 15.</i> Diagrama causal bioelectrorremediación utilizando el software Vensim Ple.....	70
<i>Figura 16.</i> Diagrama de niveles y de flujo sobre la estructura dianmica de un sitema básico de gerenación de bioelctricidad en el suelo con software Stella	71
<i>Figura 17.</i> Diagrama sobre influencia de las estrategias de gestión en la disminución de vertidos y contaminación Sofwre Stella.	72
<i>Figura 18.</i> Exploración de autopotenciales. (a) Autopotencial en zona vegetada, (b) autopotencial en zona vegetada dentro del curso de la quebrada, (c) autopotencial en zona sedimentaria, (d) autopotencial debajo de un tronco en proceso de descomposición	73
<i>Figura 19.</i> Rastreo asistemático de autopotenciales en seis puntos al azar	74
<i>Figura 20.</i> Clasificación de sedimentos de acuerdo con el color según tabla Munsell	78
<i>Figura 21.</i> Medición de autopotenciales en sedimentos clasificados por color.....	79
<i>Figura 22.</i> Voltaje de acuerdo al color	79
<i>Figura 23.</i> Potencial sustrato pantanoso (0.64 v). (b) potencial sustrato orgánico tipo compost (0.35 v). Potencial e sustrato limoso/ arenoso proveniente de mina a cielo abierto (1.5 v)	81
<i>Figura 24.</i> Comportamiento bioeléctrico de los sustratos con y sin materia orgánica durante 72 horas.....	82
<i>Figura 25.</i> Autopotenciales de la columnan bioelectrogénica y demostración de la caída de potencial al ingreso no intencional de agua en la prueba 5 arrojando un voltaje de 76.2 mV	84
<i>Figura 26.</i> Autopotenciales en los sedimentos en condiciones de humedad y secos	85
<i>Figura 27.</i> Dispositivo MudWatt utilizado para cuantificar la bioelectricidad y analizar la actividad bacteriana	86
<i>Figura 28.</i> Condiciones iniciales biorreactor Mudwatt. (a) Voltaje de arranque con electrodos de grafito, (b) voltaje 60 minutos después con electrodos de grafito (c) voltaje de arranque con el electrodo de grafito en forma de disco y (d) voltaje	87

Figura 29. Dinámica eléctrica del sedimento 10YR4/6 autopotenciales durante 30 días.....	89
<i>Figura 30.</i> Colonización por bacterias foto-heterótrofas	90
Figura 31. Evolución ecológica del sustrato en el boreactor Mudwatt.....	91
<i>Figura 32.</i> Columnas de Winogradsky con sedimentos de zonas aluviales en diferentes sectores de la quebrada la Yesca –Quibdó incubados en Columnas de Winogradsky	92
<i>Figura 33.</i> A la izquierda columna al inicio de la incubación, a la derecha columnas 30 días después de la incubación.....	93
<i>Figura 34.</i> Microorganismos presentes en columnas identificados de acuerdo con su metabolismo. bacterias quimioautótrofas de color rojo/marrón(a), bacterias que no dependen del azufre, de color rojo/púrpura (b), auto-fotótrofos y quimioheterótrofos característicos.	94
<i>Figura 35.</i> Comportamiento bioeléctrico de la columna de Winogradsky en un ciclo de un segundo. Es un método práctico para analizar un sustrato desde una perspectiva biogeoelectrónica en una columna que se constituye como una muestra del ecosistema de donde procede	94
<i>Figura 36.</i> (a) Sedimento pesado (100gr), (b) medición de potenciales en seco (-0.049 v), (c) medición de potenciales hidratado (0.072v)	95
<i>Figura 37.</i> (a) Configuración en serie de electrodos de hierro y cobre, (b) biogeobatería con el led encendido, (c) voltaje inicial de la biogeobatería, (d) pérdida de humedad, cambio de color y disminución de voltaje de la biogeobatería, (e) determinación de presencia o ausencia de materia orgánica por oxidación con peróxido de hidrógeno.....	96
<i>Figura 38.</i> Clasificación por color sedimento biogeobatería totalmente seca, (b) determinación de presencia o ausencia de materia orgánica por oxidación con peróxido de hidrógeno, (c) voltaje obtenido con la biogeobatería seca y (d) potencial de 0.57v.	96
Figura 39. (a) Mediciones de voltaje en modelo propio para mediciones de autopotenciales, (b) mediciones de conductividad en sedimentos de biogeobatería con relación a un sedimento fresco	97
Figura 40. (a) Electrodos de hierro y cobre, (b) prueba de voltaje del sustrato en minicelda, (c) configuración de electrodos, (d) voltaje de las celdas conectadas en serie, (e) prototipo con la especie <i>Dieffenbachia</i> ssp.	99

<i>Figura 41.</i> Rastreo bioeléctrico con la especie <i>Vetiver</i> a raíz desnuda con electrodos polarizables	100
<i>Figura 42.</i> Rastreo de señales bioeléctricas con la especie <i>Vetiver</i> en contacto con sedimentos	101
<i>Figura 43.</i> Rastreo bioeléctrico con la especie <i>Vetiver</i> con raíz en sedimentos en mV a las 24 horas	101
<i>Figura 44.</i> Consolidado de voltajes obtenidos con la especie <i>Vetiver</i> a raíz desnuda y en sedimentos.....	102
<i>Figura 45.</i> Diagrama de flujo Biogeolectricidad.	104
<i>Figura 46.</i> Diagrama de flujo Biogeolectricidad modelo de autorreferencia.	104
<i>Figura 47.</i> Diagrama de flujo Biogeolectricidad en función de los microorganismos.	105

RESUMEN

Con el propósito de proponer la bioelectroremediación como una alternativa biotecnológica para la sostenibilidad ambiental, se identificaron potenciales espontáneos en diferentes zonas aluviales escogidas al azar, con lo cual se evidenció, que existe en estos ecosistemas, una dinámica eléctrica natural inexplorada. Teniendo en cuenta lo anterior y en un intento inicial para representar la biocomplejidad del fenómeno biogeoelectrico objeto de estudio, se establecieron variables, relaciones y retroalimentaciones, por medio de diagramas de causalidad, para analizar la dinámica del sistema, utilizando el Software Stella.

Desde un punto de vista práctico, se desarrollaron dos prototipos de biogeobaterias artesanales. El primero de ellos fue construido con sedimentos provenientes de zonas pantanosas, obteniéndose un potencial de 10.97 voltios. En el segundo, se utilizó un sustrato húmico comercial en combinación con la especie vegetal *Dieffenbachia* ssp, con lo cual se logró un potencial de 3.4 voltios. .En ambas experiencias se demostró que es posible establecer un sistema biogeoelectrico, aplicando ingeniería inversa y principios de diseño de una pila biológica, compuesta por: suelo, agua, planta y una configuración de electrodos.

Finalmente, desde el paradigma bioeconómico, se presenta la bioelectroremediación como una estrategia pasiva, en donde la electricidad natural se convierte en fuente de información para el monitoreo de la salud ambiental en términos de remediación, lo que de igual manera, abre posibilidades para estudiar, comprender e intervenir el ecosistema, desde nuevas líneas de investigación, orientadas al desarrollo tecnológico e innovación en el departamento del Chocó.

ABSTRACT

With the purpose of proposing bioelectroremediation as a biotechnological alternative for environmental sustainability, spontaneous potentials were identified in different alluvial areas chosen at random, which evidenced that there is an unexplored natural electrical dynamic in these ecosystems. Taking into account the above and in an initial attempt to represent the biocomplexity of the biogeolectric phenomenon under study, variables, relationships and feedbacks were established, by means of causality diagrams, to analyze the dynamics of the system, using the Stella software.

From a practical point of view, two prototypes of artisanal biogeobateries were developed. The first of them was built with sediments from marshy areas, obtaining a potential of 10.97 volts. In the second, a commercial humic substrate was used in combination with the plant species *Dieffenbachia* ssp, with which a potential of 3.4 volts was achieved. In both experiences, it was demonstrated that it is possible to establish a biogeolectric system, applying reverse engineering and design principles of a biological battery, composed of: soil, water, plant and an electrode configuration.

Finally, from the bioeconomic paradigm, bioelectroremediation is presented as a passive strategy, where natural electricity becomes a source of information for the monitoring of environmental health in terms of remediation, which likewise opens up possibilities for studying, understand and intervene the ecosystem, from new lines of research, oriented to technological development and innovation in the department of Chocó.

INTRODUCCIÓN

Desde una visión convencional, la Bioelectroremediación podría definirse solamente como un concepto similar al de electrobiorremediación, conocido como un proceso que aprovecha los métodos de electrorremediación y biorremediación, para hacer más eficiente en el efluente o en el suelo la remediación (Megharaj, Ramakrishnan, Venkateswarlu, Sethunathan, y Naidu, 2011; Unzueta, Soto, Martínez, Pinto, y Hernández, 2007; Unzueta, 2010). Sin embargo, en la presente tesis se propone la Bioelectroremediación como un fenómeno emergente, que asocia múltiples paradigmas y se fundamenta en diferentes teorías de manera transdisciplinaria (Jahn, Bergmann y Keil, 2012). Desde una perspectiva científica se ubica en el contexto de la biofísica, que va más allá de modelos simplificados, ocupándose de procesos y/o transformaciones que ocurren en sistemas complejos (Misteli, 2001)

Existe una marcada tendencia de superar enfoques reduccionistas y establecer una visión holística de los sistemas biológicos desde las ciencias de la complejidad (Bertalanffy, 1968). Siguiendo un modelo de argumentación propuesto por Adam (1992), se planteó en la presente investigación el fenómeno de Bioelectroremediación como: un proceso a través del cual la biotransformación de materia orgánica por parte de microorganismos genera energía en forma de biogeoelectricidad, provocando la manifestación en el tiempo de un campo eléctrico en el ecosistema de influencia. Dicho en otras palabras, los entornos cargados orgánicamente de manera natural o estimulada, ofrecen autopotenciales eléctricos en forma de corriente continua que pueden ser registrados como potenciales, por medio de un multímetro. Según Fachin *et al* 2012, la capacidad electrogeneradora de las bacterias se puede integrar con lo que se conoce en el ámbito geofísico como potencial espontáneo, de aquí que resulta factible utilizar el modelo de biogeobaterías como método para estudiar la generación de corrientes eléctricas en el suelo conductor desde un contexto biótico (Revil *et al.* , 2015).

El rol de las bacterias con capacidades de producir electricidad, ha generado expectativas e inquietudes relacionadas con la comprensión del fenómeno y su influencia en la degradación de

contaminantes, lo cual actualmente no se comprende completamente; sobre todo en lo relacionado con los mecanismos de transferencia de electrones (Daghio et al., 2016) .

Dentro de las bacterias electrogeneradoras se encuentran las del género *Geobacter*, se pueden encontrar en zonas sedimentarias de ambientes acuáticos cargados orgánicamente y en ausencia oxígeno (Holmes et al., 2004). Teniendo en cuenta lo anterior, los ecosistemas de humedales pueden entenderse como escenarios multicomponentes y multifuncionales en donde fluye información que permite el desarrollo de procesos adaptativos y evolutivos (Michel, 2009, p. 32), razón por la que se propuso la Bioelectro remediación como una propiedad transcompleja de los ecosistemas de influencia, regulada por la dinámica biogeoelectrica de organismos vivos en interacción con el medio. Replicar este tipo de procesos concuerda con lo propuesto por (Gonzales, 2011) que defiende la idea de imitar la naturaleza (Biomimesis) proyectándola como un manual de utilidad para la humanidad [...]” (Morales, 2016, p. 144),

La gran variedad de procesos del mundo natural que dan muestra de eficiencia, eficacia y equilibrio, llevó a “los ecólogos Ramón Margalef, H. T. Odum y Barry Commoner a proponer la imitación de la dinámica económica natural de los ecosistemas como un referente para la humanidad en el contexto económico.(Riechmann, 2005, p. 1), por lo anterior se consideró factible que las zonas aluviales sirvieran de bioinspiración para ofrecer algún tipo de beneficio ambiental, social o económico, en coherencia con el postulado de Gunter Pauli de ver las amenazas como oportunidades (Sepúlveda, 2015).

Finalmente, todo lo anterior dio lugar a la idea de plantear una alternativa de remediación ambiental, bajo un nuevo enfoque que permitiera la comprensión, valoración y aprovechamiento de sitios complejos, como los ecosistemas pantanosos objeto de estudio, de manera holística, abriendo oportunidades científicas, tecnológicas e innovadoras en beneficio de la sostenibilidad ambiental desde una perspectiva bioeconómica.

1. DISEÑO TEÓRICO

1.1. Bioelectroremediación

La palabra bioelectroremediación se compone de los prefijos: bio (que hace alusión a vida) y electro (que se refiere a electricidad), los cuales están conectados con la palabra remediación que puede describirse como una serie de estrategias que permiten cumplir con estándares ambientales.

Cuando se acepta las teorías que reconocen la existencia de bacterias generadoras de electricidad, se revela una cualidad de los ecosistemas que modifica la forma de comprenderlos y va mas allá de la termodinámica conocida que define sistemas aislados sin contacto con el ambiente. Dicho en otras palabras, en este caso, la electricidad natural, derivada de microorganismos, se presenta como un fenómeno que mas allá de su naturaleza biogeofísica, encierra información codificada sobre el estado del ambiente donde se manifiesta. De igual manera, en esta manifestación natural se evidencian: modelos, leyes y teorías físicas, químicas y biológicas, que sirven de inspiración para reconocer procesos de origen natural que pueden ser replicados tal y como lo sugiere la biomimesis (Benyus, 1997).

La bioelectroremediación, es el uso de técnicas electroquímicas, que conllevan al mejoramiento ambiental de efluentes y suelos altamente contaminados con residuos sólidos y líquidos. Sin embargo, tomando como fundamento la segunda ley termodinámica (biotermodinámica), se asume la Bioelectroremediación como un mecanismo autorregulador que emerge de una complejidad sistémica, no lineal, que se manifiesta en un escenario dinámico, alejado del equilibrio y microbiológicamente electroactivo en constante interacción con el medio. En la biología pueden encontrarse muchos ejemplos de estructuras y procesos que son útiles para inspirar nuevas ideas y sugerir objetivos que son alcanzables sin necesidad de recurrir a instalaciones de gran complejidad tecnológica (Whitesides, 2015).

En la investigación holística, es posible presentar enfoques novedosos para el tema estudiado, tomando como referencia, comprensiones dinámicas y unificadas del conocimiento relacionado (Hurtado, 2000). Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso una nueva comprensión para el enfoque de electrobiorremediación, el cual se ha entendido como: una “técnica que combina las ventajas de la electrocinética, en reacciones de primer orden con las ventajas de la biorremediación”

(Alvarado, Navarro, Terán, y Vizcarra, 2015, p. 97). Se defiende la idea que es posible extraer o cosechar electricidad y simultáneamente contribuir en la autorregulación del ecosistema de influencia. Este enfoque de bioelectrorremediación se presenta como una propiedad emergente y cambia la manera de ver las zonas influenciadas por vertimientos contaminantes, las cuales pueden verse a partir del presente trabajo como laboratorios naturales para estudiar la dinámica bioeléctrica y establecer oportunidades para aprovechar los fenómenos eléctricos generados por seres vivos (Mohn, 2017 como se citó en Hernández y Sánchez, 2017).

1.2. Preguntas de investigación

¿Cómo se puede estudiar la actividad bioeléctrica del material sedimentario en zonas aluviales de ecosistemas pantanosos con influencia de aguas residuales *in situ* y *ex situ* en el departamento del Chocó?

¿Es posible desarrollar un sistema biogeoeléctrico sencillo y de bajo costo que permita demostrar la bioelectrorremediación y la generación de energía simultáneamente, en el departamento del Chocó?

¿La Bioelectrorremediación es un nuevo paradigma biotecnológico para la sostenibilidad ambiental?

1.3. Descripción del área problemática

El presente trabajo se realizó en la zona denominada como Chocó Biogeográfico. Esta ubicada al noroccidente de Colombia, posee costas en ambos océanos; con una extensión de 46.530 Km² y ocupa el 4 % de la extensión del país” (Hinestroza, Quejada, y Rivas, 2016, p. 13). A pesar de contar con potencialidades reconocidas en materia de flora, fauna, recursos hídricos y mineralógicos, la región presenta altos índices de vulnerabilidad socioeconómica y ambiental. Según el DANE, las necesidades básicas insatisfechas (NBI), corresponden al 79,2 %, la cobertura en acueducto en el área urbana (25 %) y rural (19 %) y alcantarillado en el contexto urbano (23.8 %) y a nivel rural (6.5 %) se encuentran por debajo del promedio nacional (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2015).

En Colombia, solo el 48,2 % del total de municipios cuentan con Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Ptar). [...] Según el informe “Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado”, presentado a finales de 2017 por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios), 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuentan con algún tipo de Ptar (Loaiza, 2018,)

De igual modo, no hay municipios en el departamento (30 municipios) que reporten algún sistema de tratamiento (Bastidas, 2016). Esta situación revela la vulnerabilidad de los cuerpos de agua que se convierten en los receptores de todo tipo de vertidos, lo cual altera las condiciones químicas, físicas y biológicas de los recursos hídricos en cuestión, situación que ha generado una dinámica ambiental negativa como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Escenarios representativos de zonas aluviales contaminadas por vertimientos y disposición inadecuada de residuos. A la izquierda un sector de la quebrada la Yesca (a), a la derecha zona de descarga barrio San Vicente a las orillas del río Atrato.

Fuente: el autor

En el contexto urbano del municipio de Quibdó esta irrigado principalmente por las quebradas: Aurora, la Yesca y Caraño, las cuales, de acuerdo con estudios de Contraloría General del Departamento de Chocó [CODECHOCÓ] (2014), presentan índices ICOMI e ICOSUS que evidencian en gran medida el estado de contaminación de las fuentes hídricas en mención, la cuales de manera representativa se encuentran afectadas por los elevados niveles de carga organica que llegan a estos cuerpos de agua en forma de vertidos y residuos que se derivan de las actividades desarrolladas por las comunidades asentadas alrededor de las cuencas

Cabe resaltar que aunque la urbanización como tal no representa una problemática, sin embargo, los vertimientos no controlados junto con los malos manejos de los residuos sólidos y líquidos

constituyen motivos de alarma ante el riesgo para el ambiente y la salud pública, sobre todo por los gases efecto invernadero (Troschinetz y Mihelcic, 2009) ver otras citaciones en Mosos, Cadavid y Agudelo (2012).

1.4. Antecedentes investigativos

Desde una perspectiva histórica, uno de los antecedentes que dan inicio al concepto de electricidad natural asociada a seres vivos se fundamenta en el hecho de que Aristóteles (350 a.C.) observó que el pez torpedo pez “torpedo” o “raya eléctrica” paralizaba a sus víctimas con una descarga eléctrica. De hecho, la denominada “Electroterapia”, es una rama de la Medicina y se usa a menudo en técnicas de rehabilitación por sus efectos antiinflamatorios y analgésicos (Pacheco, Padró, Dávila, Álvarez y Gómez, 2015).

A lo largo de la historia se han desarrollado muchos sistemas basados en principios bioeléctricos, son ejemplos: la electrocardiografía y el uso de baja frecuencia eléctrica de modo terapéutico. Dentro del campo de la electrofisiología se destaca Emil Du Bois-Reymond (1818-1896), a quien puede considerarse como uno de los investigadores que dieron inicio al estudio del concepto bioeléctrico y su aplicación en el campo de la medicina principalmente (Moncada, de la Cruz, y Pinedo, 2011).

Del mismo modo, surgieron investigaciones en el campo de la electroquímica para el tratamiento de contaminantes, siendo la biorremediación una de las estrategias que hace referencia a este tipo de mecanismos en los cuales mediante la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa se logra remediar suelos (Granda, 2011). El equipo de científicos del Instituto RIKEN y la Universidad de Tokio acuñaron el término “Electroecosistemas” y realizaron investigaciones de electroecosistemas gigantes en un entorno hidrotermal profundo (Nakamura *et al.* , 2010). A Sir William Grove en 1839, se le atribuye el hallazgo del principio de operación de las celdas de combustible (García, 2014).

Al analizar el discurso teórico, científico y técnico, se relacionan a continuación algunos trabajos de referencia en los que se apoyó el presente estudio. Revil y colaboradores (2010) en un artículo denominado “Comprensión de las biogeobaterías: donde la geofísica se encuentra con la microbiología”, estudiaron la forma en que se comporta un ambiente contaminado como una

geobatería que produce corriente eléctrica y explicaron las contribuciones electroquímicas de las señales de autopotencia en áreas contaminadas. En ese orden, acuñaron el término biogeobatería (*biogeobattery*) y desarrollaron el modelo teórico correspondiente.

Por su parte, Van de Velde (2016) estudiaron el impacto de la oxidación de azufre electrogénica/o en la biogeoquímica de los sedimentos costeros, determinando las corrientes eléctricas inducidas en la capa superficial. En general, demostraron que las bacterias allí presentes se comportan como un cable que transmite electricidad y que influye en el ciclo biogeoquímico en condiciones *in situ*. Por otro lado, Risgaard *et al.* (2015) indicaron que las corrientes eléctricas mediadas por cables bacterianos podrían ser importantes para la biogeoquímica en muchos más entornos de los previstos hasta ahora, y sugirieron una evolución común del fenotipo del cable utilizando el género bacteriano *Desulfobulbaceae* y su diversificación genética presente en agua dulce y marina.

De otro lado, Nils *et al* (2015) manifestaron que el rastro fósil de la bacteria *Trichichnus* se propone como un indicador de la actividad bacteriana bioeléctrica en la zona de interfaz anóxica de sedimentos marinos. Por lo tanto, recomendaron considerarlo como un fosilizado tipo cable eléctrico Alatorre, Cortina, Campos y Birch (2008) interpretaron en un vertedero de desechos urbano ubicado en Mexico, anomalías de potencial espontáneo. En un vertedero pueden ocurrir potenciales espontáneos (PE) producidos por varias clases de fenómenos: migración de líquidos muy conductores (escurrimientos), degradación de la materia orgánica (procesos bioquímicos) y oxidación de elementos metálicos, cambios y diferencias de presión provocados por gases o líquidos, reacciones químicas entre lixiviados y metales, cambios de temperatura. Mendonca (2016) pretendió definir directrices para la caracterización de procesos bioquímicos por medio de datos geofísicos, así como para estrategias de remediación dirigidas a disminuir la generación de metano y consecuente escape a la atmósfera. Las biogeobaterías representan procesos con transporte de electrones de niveles más profundos hasta porciones superficiales de la zona insaturada, oxidando en ese proceso la materia orgánica soterrada por sedimentos o descartada en vertederos.

En ese mismo sentido, Wei (2009) determinó cuáles son los datos de autopotencial de la superficie de un vertedero para determinar el mecanismo fuente que genera anomalías o potenciales espontáneos SP en sitios ricos en contaminación orgánica y para probar el modelo de

biogeobatería para sitios ricos en contaminación orgánica. Bigalke y Grabner (1997) explicaron que en geofísica los mínimos de potencial eléctrico estático, a lo largo de la superficie de la tierra se llaman anomalías de autopotencial que pueden ser causadas por procesos electroquímicos de la corteza terrestre similar a una celda galvánica, entendida como una mineralización conductiva electrónica que conecta regiones de diferente potencial redox y que tal configuración forma una célula electroquímica gigante llamada geobatería.

Ahora bien, la referencia más antigua relacionada con la construcción de biogeobaterías, la constituyen los desarrollos relacionados con las baterías de suelo (*earth battery*), siendo la experiencia más antigua la de Alexander Bain (1810 - 1877), quien demostró la capacidad del suelo húmedo para ayudar a generar electricidad (Khan, Saleem y Abas, 2008).

También, Khan, Saleem y Abas (2008) presentaron en el Segundo Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica un estudio experimental sobre baterías de suelo, reportando el diseño, la construcción y la operación de una batería de tierra como fuente de energía alternativa de baja potencia, encontrando que el voltaje de una sola celda permanece constante independientemente de los tamaños de los electrodos. Se trató de un estudio característico que detalló los más rentables y accesibles para la construcción de electrodos de metal, necesarios para el funcionamiento de la batería de tierra como un servicio gratuito.

Igualmente, Harish, Dhabalakshmi y Gireesh (2016) informaron en un estudio sobre electrodos de metales económicos para la construcción de baterías de tierra. Por ende, un par de electrodos positivos y negativos insertado en el suelo mantenido en un recipiente aislante es un 'suelo celda'. Además, manifestaron que el voltaje puede aumentar conectando múltiples electrodos en serie y la corriente al conectar las células del suelo en paralelo, que si es integrado a un convertidor elevador es posible obtener un alto rendimiento de voltaje,

Otras avances que utilizan un principio similar de operación lo constituyen las celdas de combustibles microbianas y aunque aún se encuentran en etapa de desarrollo algunas organizaciones, universidades e investigadores independientes se encuentra experimentando con la construcción de este tipo de dispositivos. Para Falcón, Lozano y Juárez (2009), se fundamenta en la capacidad que tienen los organismos vivos en producir electricidad. Según con Logan *et al.* (2006), quienes son unos de los principales investigadores que utilizaron la capacidad de microorganismos en la generación de electricidad directa, a través de dispositivos denominados

celdas de combustible microbianas; las definieron como artefactos en donde por medio de la acción de microorganismos se genera energía directa como producto de la biotransformación de materia orgánica.

Es de señalar que el rol de las bacterias es uno de los aspectos importantes en el tema de las celdas de combustible microbianas, por esa razón, Romero, Vásquez y Lugo (2012) en su trabajo sobre las bacterias como fuente de energía para el futuro, hicieron referencia a las bacterias del género *Geobacter* y la capacidad que poseen de producir electricidad como resultado de proceso de oxidación. Gaviria *et al.* (2009) estudiaron el comportamiento de dos celdas y mencionaron que los exoelectrógenos (bacterias generadoras de electrones) como la *Saccharomyces* y la *Escherichia coli* fueron estudiados por Potter (1911) y demostraron producción potencial..

De otro lado, Cervantes (2011) en la Universidad Nacional Autónoma de México desarrolló como tesis doctoral el trabajo denominado “Biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana”. Se tenía como objetivo general evaluar la degradación de materia orgánica y generación de corriente eléctrica en una celda de combustible microbiana (CCM) alimentada con agua residual; considerandola como una tecnología prometedora para la producción de corriente eléctrica acoplada con la biodegradación de materia orgánica

En el año 2008, algunos trabajos describen *sediment microbial fuel cells* (SMFCs) en presencia de las plantas de arroz (Kaku, Yonezawa, Kodama, y Watanabe, 2008; Schampelaire *et al.*, 2008 como se citó en Goto *et al.* , 2015) y *mannagrass*, un tipo de pasto (Strik *et al.* 2008 como se citó en Goto *et al.* , 2015). Helder (2012) desarrolló como tesis doctoral en Wageningen University el trabajo denominado “*Electricity generation with living plants – from lab to application*”, indicando que se trató de una investigación en donde se estudió la generación de electricidad con plantas vivas desde el laboratorio a la aplicación, siguiendo criterios de diseño para celdas de combustible con plantas y microorganismos en sinergia.

De igual forma, Revelo, Hurtado y Ruiz (2013), en un trabajo sobre Celdas De Combustible Microbianas (CCMs), hicieron referencia a la remoción de materia orgánica y la generación simultánea de energía, considerando los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de dispositivos, los cuales son: “La densidad de potencia (DP), la eficiencia coulombica (EC) (Rismani-Yazdy *et al.* , 2011) y la resistencia interna (RI)

(Borole *et al.*, 2009)” (como se citó en Revelo, Hurtado y Ruz, 2013, p. 20). Guambo y Allauca (2015) estudiaron la influencia de la demanda bioquímica de oxígeno de aguas residuales en la producción de bioelectricidad de una celda de combustible microbiana.

En ese mismo sentido, Gretel (2016) desarrolló como tesis de maestría en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica de México, un análisis técnico – económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la producción de energías alternas. Pucci, Acuña y Pucci (2013) plantearon la electrobiorremediación como un concepto interesante al incorporar el componente (bio) dentro del sistema electrorremediativo. En algunos estudios se han obtenidos resultados con su uso para la eliminación de contaminantes, tal es el caso de suelos contaminados con petróleo (Acuña, Pucci, Morales, y Pucci, 2010). A partir de los valores de amperaje y voltaje se ha logrado demostrar la disminución de las fracciones del hidrocarburo sin afectar las poblaciones de bacterias presentes (Wick et al. 2007, Harbottle et al. 2009, Lear et al. 2004 como se citó en Pucci *et al.*, 2013).

En un trabajo desarrollado en la Universidad del Valle – Colombia se estudió la respuesta electrogénica de lodos y aguas provenientes del lago del campus de dicha universidad, usando una celda de combustible microbiana (MFC) de bajo presupuesto demostrando una gran actividad catalítica para la oxidación de materia orgánica (Fernández, 2012). García, Bautista-Vargas, Pérez-Bravo y Carrillo (2015) realizaron un estudio en México para determinar materia orgánica en sedimentos de lagunas costeras y establecer la factibilidad de uso en una celda de combustible microbiana para generación de energía sostenible.

Ahora, los sustratos también han sido objeto de investigaciones, tal es el caso del trabajo realizado por Azizul, Yoshitake, Sifat y Strik (2015), quienes llevaron a cabo un experimento para producir energía verde (bioelectricidad) mediante el uso de células de combustibles microbianas con plantas de arroz (PMFC) en suelo mezclado con compost. Demostraron que las plantas de arroz y compost mostraron valores de voltaje de 700 mV y densidad de potencia más altos con el tiempo. Zaghum, Rafatullah, Ismail y Izzuddin (2017) realizaron una revisión de celdas de combustible microbianas con sedimentos y las proponen como un recurso que permite obtener energía sustentable y permite la remediación de metales pesados.

Por su parte, Kumar, Chiranjeevia, Kishore y Mohan (2018) diseñaron un sistema de ingeniería ecoelectrogénica (EES) para imitar el papel funcional de los ecosistemas acuáticos naturales,

evaluando su respuesta y la actividad bioelectrogénica conectando tres tanques con biota funcionalmente diversa. La interacción de microbios y plantas estudiadas en la interfaz de los aspectos electroquímicos y de ingeniería ilustraron la viabilidad de EES como un sistema autosustentable con biota acuática funcional diversa innata y rizo-microbioma para producir bioelectricidad.

De la misma manera, Mounia, Tou, Sadi, y Benhabyles (2018) realizaron un estudio con las plantas *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* y *Papyrus diffuses*, usando Células de Combustible Microbianas (MFC), produciendo respectivamente, corriente máxima de 25, 31 y 19 mA/m², sin el uso de ningún nutriente o membrana. En este estudio, la importancia de la luz se demostró por los altos valores de corriente generados durante el día y se examinaron los microorganismos en la interfaz ánodo-rizosfera. Además, el proyecto iMETlan, coordinado por IMDEA Agua (2018), busca construir y validar un dispositivo para el tratamiento de aguas residuales urbanas en pequeñas comunidades sin aporte externo de energía, basándose en el metabolismo de microorganismos denominados bacterias electroactivas.

A continuación en la Tabla 1, se presentan otros estudios en donde se utilizaron otras especies vegetales que demostraron rendimientos bioeléctricos con respecto al área.

Tabla 1. Rendimientos bioeléctricos con respecto a la especie

Especie vegetal	Rendimiento bioeléctrico	Referencia
<i>Glyceria Maxima</i>	67 mW/m ²	Strik et al. 2008
<i>Oryza sativa sp.indica</i>	33 mW/m ²	De Schamphelaire et al. 2008
<i>Spargina anglica</i>	222 mW/m ²	Helder et al. 2010
<i>Oryza sativa l. cv. Satojiman</i>	14 mW/m ²	Takanezawa et al como se citó en Goto et al. , 2015
<i>Flat plate plant MFC</i>	5.8 mW/m ²	Helder et al. como se citó en Goto et al. , 2015
<i>Penicetum setaceum</i>	163 mW/m ²	Chiranjeevi, Mohanakrishna y Mohan, 2012
<i>Submerged and emergent macrophytes</i>	179.78 mW/m ²	Chiranjeevi et al.
<i>Spartina anglica</i>	155 mW/m ²	Helder et al. , 2012
<i>Spartina anglica</i>	240 mW/m ²	Wetser et al. , 2015
<i>Spartina anglica and Phragmites australis</i>	1.3-18 mW/m ²	Wetser et al. , 2015

Fuente: el autor.

Desde el punto de vista aplicado, este tipo de tecnologías vienen siendo empleadas en algunos dispositivos que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Prototipos biogeoelectrónicos de referencia*

<i>Prototipo</i>	<i>Descripción</i>
Planta Nómada	Las plantas nómadas, son “un prototipo de organismo pro biótico de correlación simbiótica y energética” (Constantini, 2010, párr. 1).
 Plant-e	Empresa ubicada en los países bajos. Utilizan plantas vivas para generar electricidad que permite cargar teléfonos y lámpara led entre otros dispositivos “[...]” (Flores, 2015, párr. 1).
Planta lámpara	“Un modelo de lámpara que produce energía limpia y auto sostenible en función de la tierra y la fotosíntesis” (Dioses, 2015, párr. 1).
Moss Biophotovoltaic.	Utilizan especies como: plantas pequeñas, musgos y cianobacterias, a las cuales se les aprovecha un tipo de energía que es generada antes de ocurrir la fotosíntesis y la han denominado Bio-Foto-Voltaica (BFV) - (Sanz, 2012, párr. 3)
 E-Kaia	“Dispositivo portátil que por medio de un biocircuito capta y transforma en electricidad la energía de plantas” (iCrowdNewswire, 2016, párr. 1).
 bioo <small>electricity has never been greener</small>	No cuenta con ninguna certificación ni comprobación científica externa de que esto sea posible. Pero se trata de otro modelo comercializado que utiliza el metabolismo de la planta para producir energía.
Soil Lamp	“Marieke Straps es quien está detrás de este invento, una lámpara que funciona aprovechando la energía del suelo. [...] Solo aprovechando el mecanismo de conductividad natural [...]” (ECO Portal, 2014, párr. 2-6).
Mudwatt	Kit de Ciencias de la educación que utiliza los microorganismos encontrados naturalmente en el suelo para generar electricidad.

Fuente: el autor. (Ver anexo 2)

1.5. Justificación de la investigación

En el mundo, una gran cantidad de aguas residuales no son tratadas, así lo reporta el Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos (2017). Esta situación genera como consecuencia el incremento de cuerpos de agua sin oxígeno, lo cual repercute negativamente en el ambiente y en las dinámicas productivas que se desarrollan en estos escenarios, como por ejemplo, la industria pesquera, el desarrollo de cadenas alimentarias y medios de subsistencia. Se estima

que la afectación abarca una superficie aproximada de 245.000 km. (World Health Organization, 2016).

Dicho en otras palabras: aguas residuales domésticas, lixiviados de actividades mineras y de botaderos de residuos, y diferentes sustancias de peligrosidad, llegan a las fuentes hídricas generando la necesidad apremiante de establecer mecanismos y aplicar instrumentos efectivos que permitan controlar la calidad de las aguas (Pérez y Rodríguez, 2008).

Sin embargo, no se trata de un tema inherente solo al recurso hídrico; pues son conocidos los efectos perjudiciales, especialmente en la salud humana, que se generan por problemas de contaminación ambiental en cualquiera de sus formas, esto ha desencadenado la implementación de una serie de estrategias internacionales encaminadas a establecer soluciones que atiendan los riesgos para la salud de la población involucrada y los efectos medioambientales causados [...] (FAO, 2016).

Con la presente investigación, se responde activa y coherentemente a la necesidad de construir una epistemología desde nuestros contextos, considerando las condiciones ambientales críticas del entorno como un universo de posibilidades para generar alternativas de interés científico, económico y socioambiental, tratando de superar creativamente, las limitaciones que genera estar ubicados dentro de un territorio con el mayor índice de pobreza monetaria en el país con el 58,7% (DANE, 2017) y poseer un índice departamental de innovación de 19,06 en la escala de (0-100) en el 2017, ocupando la posición 24/26 en el país. Siguiendo a Gunter Pauli, se trata de encontrar oportunidades en donde solo se ven problemas, de cara a los retos de la actualidad en materia de sostenibilidad, coincidiendo con el pensamiento de Leff que postula la epistemología ambiental como aquella orientada al establecimiento de una nueva racionalidad productiva derivada de la construcción de nuevo conocimiento.

Se trata entonces de un trabajo que permite: abrir nuevos escenarios de investigación para identificar usos potenciales y servicios ambientales en ecosistemas pantanosos, representados en las zonas aluviales como se muestran en la figura 2.



Figura 2. (a) Ecosistema aluvial. Zona de influencia orillas río Atrato Quibdó- Chocó y (b) Zona aluvial influenciada por la quebrada la Yesca, barrio Buenos Aires Quibdó- Chocó.

Fuente: el autor.

De acuerdo con la visión Ambiental Regional, el departamento del Chocó para el 2021 debe ser reconocido como una eco-región con niveles de manejo de sus recursos naturales acorde con las características de sus ecosistemas y las manifestaciones culturales de los grupos étnicos predominantes (CODECHOCÓ, 2012).

Para ir en esta dirección, la oferta de bienes y servicios ambientales en la región debe articularse a la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos, lo que permita promover la conservación, el conocimiento y el uso sostenible de la biodiversidad, así como la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de la utilización de los conocimientos, innovaciones y prácticas asociados a ella por parte de la comunidad científica nacional, la industria y las comunidades locales. Esta tiene unos lineamientos estratégicos que se basan principalmente en: conservar, conocer y utilizar (CODECHOCÓ, 2014).

Por otra parte, el principio 15 de la Declaración de Río dice que "[...] cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente" (Lora, 2011, p. 23). Todo lo anterior, concuerda de igual manera con la visión 2025 para la región, que persigue el posicionamiento del territorio en materia de ciencia, tecnología e innovación para un desarrollo sostenible en armonía con el contexto, multicultural, pluriétnico, biodiverso y húmedo a través de la implementación de iniciativas que fortalezcan los focos estratégicos dentro de los que se encuentran el ambiente y la biodiversidad (Colciencias, 2016).

La investigación en cuestión denominada “Estudio Sobre la Bioelectroremediación como Alternativa Biotecnológica para la Sostenibilidad ambiental en el Departamento Del Chocó”, abre un universo de posibilidades para estudiar los problemas de contaminación ambiental, desde nuevos paradigmas con proyección bioeconómica que se fundamentan en las ciencias de la complejidad. Es de señalar que en la naturaleza no existe nada en forma aislada (UNESCO, 2010), sin embargo y de manera habitual, las disciplinas tradicionales suelen reducir la realidad. Tanto

los problemas ambientales como las soluciones para los mismos deberían abordarse desde una perspectiva holística integradora que considere todas las dimensiones del desarrollo sostenible.

Lo anterior dio lugar a incursionar en el estudio de procesos que han empezado a reconocer las aguas residuales como una fuente renovable para la producción de electricidad, lo cual a su vez podría emplearse para el mismo proceso de tratamiento de efluentes (Aelterman et al., 2006, Logan y Reagan, 2006), contribuyendo al posicionamiento de energías renovables que se encuentran aún poco implementadas debido principalmente, a restricciones tecnológicas y políticas (Zerta et al., 2008, Buran et al., 2003, Siddiqui et al., 2010, Panwar et al., 2011).

Las celdas de combustible microbianas, conocidas también como MFC por sus siglas en inglés (Microbial Fuel Cell), “resultan ser una opción prometedora para la generación de energía renovable que se pueda emplear como electricidad” (Logan y Regan, 2006a); además ofrecen grandes posibilidades de aplicación en lugares donde existen limitaciones o no hay disponibilidad para el acceso a fuentes de energía (Peter K. Wua, 2012). “También es posible que las CCM (celdas de combustible microbianas) puedan ser modificadas y ser usadas como una tecnología para la biorremediación de suelos contaminados, a pesar de que esta aplicación está menos desarrollada” (Rabey et al., 2005 como se citó en López, 2013, p. 27).

La biorremediación basada en las actividades metabólicas de los microorganismos esta ganando popularidad debido a su rentabilidad y benignidad ambiental con respecto a los métodos fisicoquímicos (Rodrigo, 2016). La tecnología de los MFC puede modificarse de formas interesantes y valiosas para la remediación ambiental sostenible. Las células de electrorregulación microbiana (MER) comparten algunos principios de MFC, pero con un propósito diferente. Aunque ambos son sistemas electroquímicos microbianos, difieren en el modo de operación. Mientras que los MFC tienen como objetivo maximizar la generación de energía (vatios), los MERC tienen como objetivo alcanzar la máxima producción actual (amperios) a través de la maximización de la oxidación / reducción metabólica de los compuestos orgánicos / inorgánicos del suelo (Rodrigo, 2016).

Realizar la presente investigación constituyó un reto que exigía de manera inicial desarrollar conocimiento descriptivo, normativo y orientado a la práctica, con el fin de ayudar a resolver, mitigar o prevenir problemas del mundo en el cual vivimos como bien lo dice Hadorn, Pohl y Scheringer (2004)” (Serna, 2016, p. 225). Sin embargo , desde escenarios como el de referencia,

es necesario evaluar la construcción de este tipo de sistemas utilizando materiales económicos, con diseños asequibles para comunidades con baja posibilidad de inversión, de manera que se incentive la apropiación de esta tecnología a gran escala” (Pineda y Rosas, 2016, p. 198).

Metodológicamente se trata de una investigación que innova al desarrollarse en el contexto de la transcomplejidad, lo que para Villegas (2006), es un nuevo modo de producir conocimientos transdisciplinarios, adoptando una posición abierta, flexible e inacabada, integral y multivariada, donde lo cualitativo, cuantitativo y lo dialéctico se complementan en una relación sinérgica, configurando una matriz epistémica multidimensional. Es de señalar que en la naturaleza no existe nada en forma aislada (UNESCO, 2010) y es por ello que se trata de todo un desafío, técnico y no técnico, al tratar de abordar , estrategias de “remediación holísticas” para “sitios complejos”, donde el progreso de la remediación es incierto y no se puede predecir que la gestión se logre a largo plazo o dentro de un marco de tiempo razonable (Consejo de Tecnología y Regulación Interestatal- ITRC, 2017)

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar el uso potencial de sedimentos acuáticos provenientes de ecosistemas pantanosos en biogeobaterias como alternativa biotecnológica ambiental en el contexto del departamento del Chocó.

1.6.2. Objetivos específicos

Identificar el fenómeno de la Bioelectro remediación a partir del modelo de biogeobaterias construidas con sedimentos provenientes de zonas aluviales con influencia de aguas residuales.

Desarrollar dos sistemas de biogeobaterias artesanales a bajo costo: con sedimentos y con plantas con fines tecnológicos aplicando ingeniería inversa.

Analizar la bioelectro remediación como alternativa biotecnológica

1.7. Categorías de análisis

Dinámica de sistemas (metodología)

Bioelectrorremediación (alternativa)

Biogeobaterias (sistema)

1.7.1 Hipótesis

La biogeoelectricidad de sedimentos en zonas aluviales con influencia de aguas residuales es un indicador de actividad bioelectrorremediativa.

La bioprospección eléctrica constituye un método que permite identificar y registrar la actividad eléctrica de sistemas biológicos en un lugar determinado.

Un sistema de Bioelectrorremediación por medio de biogeobaterias, permite extraer gradientes biogeoelectricos acumulados en sedimentos.

La bioelectro remediación permite comprender la dinámica del ecosistema desde una perspectiva biogeoelectrica.

1.7.2. Matriz de variables

Tabla 3. *Matriz de variables*

Variable	Descripción
Densidad de potencia	De acuerdo con Logan <i>et al.</i> , 2006 es la corriente eléctrica producida por unidad de volumen de la CCM” (Ruiz, 2016, p. 11)
Campo eléctrico	En un punto determinado se produce por una o varias cargas, definiéndose como campo eléctrico \vec{E} se expresa en (v/m) .
Potencial	(Briceño y Leon, 1993)

Fuente: el autor.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Contaminación ambiental

Se entiende por contaminación la presencia en el aire, agua o suelo de sustancias o formas de energía no deseables en concentraciones tales que puedan afectar al confort, salud y bienestar de

las personas, y al uso y disfrute de lo que ha sido contaminado. Esto es, un medio o vector ambiental (aire, agua o suelo) estará contaminado si tiene algo (sustancias materiales, energía en forma de ruido, calor...) que provoca efectos negativos en él [...]. (Encinas, 2011, p. 3)

2.1.1. Tipos de contaminantes

Los contaminantes pueden existir en diferentes formas químicas dependiendo de las condiciones ambientales, estos subsisten como precipitados sólidos, solutos disueltos en el fluido del poro o en agua ligada al suelo, sorbidos en forma de complejos en partículas superficiales enlazados a la materia orgánica. Entre todas estas formas, solo los solutos disueltos son móviles y pueden ser removidos por electroremediación (Cox, Shoesmith, y Ghosh, 1996).

2.1.1.1. Contaminantes inorgánicos

“Los contaminantes inorgánicos son diversos productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de la erosión del suelo, descargas domésticas, agrícolas e industriales. Los principales son cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos” (Carrato y Marval, 2007, p. 109).

2.1.1.2. Contaminantes orgánicos

Los principales contaminantes orgánicos son de naturaleza muy variable (fitosanitarios, aceites, petróleos, gasolinas, entre otros); entre todos los contaminantes orgánicos son los fitosanitarios la causa más frecuente de contaminación. Se trata de productos de uso universal en agricultura. Dentro de los fitosanitarios están los plaguicidas, herbicidas y fertilizantes, son ejemplo también las aguas residuales domésticas, las cuales son flujos de agua conformados por la combinación de las excretas eliminadas por la población, que incluye heces y orina; además, contiene desechos de animales domésticos, residuos de lavandería, residuos de industrias caseras y residuos de actividades culinarias (Cifuentes, 2007).

2.1.1.3. Contaminantes microbiológicos

Muchos microorganismos entre los que se encuentran bacterias, virus y protistas parásitos, pueden provocar enfermedades infecciosas de transmisión hídrica. Un indicador muy utilizado para detectar la contaminación microbiana del agua es el grupo de bacterias coliformes, cuya presencia indica una probable contaminación fecal (Madigan et al, 2015).

2.2. Biotecnología

Como su nombre lo indica, la biotecnología está relacionada con la vida, ya que utiliza a los seres vivos para producir bienes y servicios de utilidad para el hombre. En el contexto ambiental las acciones y propósitos van encaminados a desarrollar estrategias que permitan reducir, prevenir, mitigar, controlar o eliminar problemas como la contaminación, utilizando la capacidad biotransformadora de muchos organismos vivos o sus derivados. Por medio de la biotecnología es posible aplicar modelos biológicos en el desarrollo de tecnologías. Este campo científico en conjunto con la ingeniería genética, genera gran interés y constituye uno de los sectores de mayor demanda en el siglo XXI (Carreño, 2016).

2.2.1. Biorremediación

Desde el campo biotecnológico se trata de utilizar el metabolismo de los organismos vivos para la remoción, transformación o inactivación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en el ambiente. Dentro de las estrategias de biorremediación se encuentran: la atenuación natural, la bioaumentación y la bioestimulación (González, 2011).

2.3.1.1 Electrobiorremediación

En la Tabla 4 se muestra un resumen de aspectos teórico de la bioelectroremediación que une los beneficios de la biorremediación y la electrocinética para remover contaminantes.

Tabla 4. *Tabla de comparación Biorremediación y Electrorremediación*

Electrobiorremediación	
Biorremediación	Electrorremediación
Biotecnología que permite la remoción de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos utilizando organismos vivos	Según García, Vargas y Reyes (2011): es una tecnología que permite aprovechar la conductividad del suelo para movilizar y extraer contaminantes utilizando un campo eléctrico que se genera mediante la aplicación de un potencial. (p. 24)
Mecanismos biológicos	Mecanismos fisicoquímicos
Metabolismo de plantas y microorganismos	Aplicación de un campo eléctrico
Fundamento bioquímico serie de reacciones de óxido-reducción.	Fundamentos electroquímicos
Se ve afectada por factores como pH, disponibilidad de nutrientes, oxígeno y humedad.	pH, Contenido de agua, Conductividad eléctrica, Potencial zeta (ζ), Naturaleza y química del suelo, Naturaleza del contaminante, Naturaleza y arreglo de los electrodos
Acción enzimática	El electrón es el único “reactivo”
Enzimática, microbiana y fitorremediación	Electromigración Electroforesis Electroósmosis Electrolisis Calentamiento eléctrico

Fuente: el autor.

2.3.1.2 Bioelectroremediación

Desde el concepto de ecoelectrosistemas propuesto por el científico Ryuhei Nakamura en el 2015 para referirse a un tercer tipo de ecosistema, en donde la actividad microbiana es regulada por la corriente eléctrica continua, surge el interés por establecer una nueva forma de abordar, comprender y valorar la naturaleza desde una perspectiva bioeconómica.

Nakamura no se equivocó al proponer la existencia de este tipo de ecosistema liderado por organismos quimilitoautotróficos que coexisten sinérgicamente con los fotótrofos y quimiótrofos, constituidos en dos ecosistemas interconectados. Se resaltan las cualidades de las bacterias del hierro, las cuales son representantes del metabolismo quimilitoautotrófico abundante en ambientes anaerobios, reductores, anóxicos, carentes de oxígeno de los suelos y sedimentos de los cuales extraen los sustratos minerales para su metabolismo energético (Ibáñez, 2010).

Según Kim *et al.* (2007) como se citó en Buenaño y Cruz (2016):

La presencia de una sustancia tóxica puede inhibir potencialmente la actividad metabólica de bacterias electroquímicamente activas (BEA) y reducir la transferencia de electrones,

así como la salida de corriente, debido a ello se puede utilizar los datos del voltaje como una señal para controlar la aparición y la intensidad de un evento tóxico, por consiguiente, la celda de combustible microbiana se puede utilizar como una línea de biosensor para la detección de compuestos tóxicos en agua. (p. 9)

Desde la biofísica, los fenómenos macroscópicos son estudiados teniendo en cuenta teorías que se fundamentan en la fotoquímica, la termodinámica, la cinética y la electroquímica, articulando enfoques mesoscópicos y microscópicos (Disalvo, 2015). En este sentido la Bioelectroremediación, se propuso como un concepto transdisciplinar que centra su atención en la electricidad biológica como una cualidad del ecosistema que puede ser entendida y aprovechada desde la perspectiva de los sistemas complejos.

2.2.2. Bioenergía

El uso de energías convencionales y no convencionales está regulado por el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Dentro de la normatividad en esta materia se encuentra: 1. La Ley 697 de 2001, en la cual se establece el uso racional y eficiente de la energía, además de promover el uso de energías alternativas y otras disposiciones; 2. La Ley 143 de 1994 en su artículo 66-68 que establece el ahorro, conservación y uso eficiente de la energía; 3. La Ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley busca el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía y la eficiencia energética. Desde el campo de la Biotecnología se denomina como bioenergía: La energía renovable que se produce a partir de diversas fuentes biológicas (Mitchell, 2000, Srebotnjak et al., 2011, Panwar et al., 2011a). Existen diversas tecnologías que se enfocan en la utilización de la energía acumulada en la biomasa de residuos como son: la metanogénesis (CH_4), el biohidrógeno (H_2) y la bioelectricidad (Logan et al. 2006).

2.3.2.1. Bioelectricidad

Dentro de los organismos vivos que sorprenden con sus mecanismos eléctricos se encuentran los microorganismos, a los cuales se les ha descubierto la capacidad de realizar procesos de

conversión y conducción de energía de manera eficiente. A la energía eléctrica generada a partir de energía química por medio de procesos biológicos se le ha definido como bioelectrogénesis (de la Vega, 2015, p. 1). Este tipo de microorganismos electrogeneradores suelen encontrarse en ambientes acuáticos anaerobios, siendo una de las más representativas las del género *Geobacter* poseedoras de un especial mecanismo de respiración de minerales que se le ha denominado como modelo de electrogénesis (Nuñez, 2008). En este campo los esfuerzos de investigación se han direccionado al estudio, modificación y cultivo de microorganismos con potenciales energéticos para el desarrollo de prototipos conocidos como celdas de combustible microbiana, término que acuñaron por primera vez Nevin, Woodard, Franks, Summers y Lovley (2010) para referirse al proceso donde la fuente de energía es la electricidad. En general, utilizan la biocatálisis para oxidar materia orgánica o inorgánica y generar corriente eléctrica simultáneamente (Rabaey et al., 2007; Rozendal et al., 2008).

2.3.2.1.1 Bioelectricidad vegetal

Algunos prototipos se están desarrollando para aprovechar la fotosíntesis y generar electricidad suficiente para encender por ejemplo dispositivos de tecnología móvil (Mata-González, Dimas-Reséndiz, y Machuca-Pulido, 2017). Las plantas a partir de la rizodeposición son aportantes del combustible orgánico para que los microorganismos metabolicen y degraden sustancias, siendo esta la forma en que las especies interactúan con el medio por medio de sus raíces. Por su parte, los microorganismos de acuerdo con su metabolismo contribuyen en la degradación de sustancias haciéndolas biodisponibles para el desarrollo vegetal, pero a su vez generando un gradiente eléctrico que en la actualidad se estudia en dispositivos denominados celdas de combustible microbianas (CCM) (Pineda y Rosas, 2016).

2.3.2.1.2 Bioelectricidad microbiana

Tal como se refirió en la sección de antecedentes, se conoce que Potter en 1910 fue uno de los pioneros en revelar que los microorganismos desarrollaban actividad eléctrica, para ello utilizó cultivos de *E. coli*. Con el desarrollo de celdas de combustible se han ampliado las investigaciones y los hallazgos en cuanto a las capacidades de los microorganismos en generar energía en ausencia de mediadores redox artificiales (Lovley, 2006 como se citó en Pineda y Rosas,

2016). Una celda de combustible microbiana se comporta como un sensor de sustancias (Ortiz, Moreno, y Jiménez, 2014), lo cual concuerda con que en ocasiones las variaciones del contenido de humedad pueden producir PE, (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, s.f, párr. 127). Esta posibilidad constituye una de las aplicaciones de las celdas de combustible como biosensores, en donde los ecosistemas responden a diferentes estímulos eléctricamente, permitiendo no solo entenderlos sino también monitorearlos (Falcón, Estéban, y Juárez, 2009).

2.3.2.2. Bioelectroprospección

Solo se puede valorar lo que se conoce (Carranza, 2017) y en este sentido la bioelectroprospección se planteó desde con la finalidad de explorar corriente continua en el medio natural por medio del modelo de biogeobaterias. Lo anterior se soporta en el concepto de bioprospección citado en el documento CONPES 3697 , el cual se entiende como la búsqueda de nuevas fuentes de bienes y servicios derivados de la biodiversidad con potencial de aprovechamiento comercial de manera sostenible (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2011, p. 35).

2.2.3. Bioeconomía

Desde el enfoque de la presente investigación, la electrogeneración microbiana se presenta como un proceso biológico que puede ser utilizado, tal y como lo postula el paradigma bioeconómico que permite aprovechar el conocimiento de los sistemas, procesos y principios biológicos, y las tecnologías tradicionales y modernas aplicables al conocimiento, emulación y transformación de los recursos, sistemas, procesos y principios biológicos (Rodríguez, 2017, p. 3)

2.4. Biogeobatería

El término biogeobatería acuñado por Revil et al. (2010) como se citó en Lopes (2010) explica el papel de los procesos bióticos en la generación de corrientes eléctricas en el suelo conductor. Para la comprensión del concepto complejo de biogeobatería es necesario integrar las disciplinas geofísicas, geoquímicas y microbiológicas.

Tanto la respuesta de autopotencia como el papel activo o pasivo de las bacterias en estos sistemas son objeto de estudio en este modelo análogo que permite monitorear, de una manera práctica y relativamente sencilla, superficies del suelo con cargas contaminantes. En concordancia con lo dicho por Revil et al. (2009) como se citó en Lopes (2010), la ausencia de anomalías de autopotencia fuertes (> 100 mV) parece estar a su vez relacionada con la ausencia de electrones conductores. Dicho de otra forma, la ausencia de corriente eléctrica puede significar que la naturaleza no puede degradar contaminantes presentes.

La conducción de electrones en el esquema de biogeobateria como se muestra en la figura reacciones anódicas que involucran la oxidación de sustrato orgánico se acoplan con reacciones catódicas de reducción del oxígeno o del nitrato.

Según Fachin, 2012, el modelo propone que la transferencia de electrones se realizara: (a) por estructuras orgánicas conductivas, pilus, en conexión con minerales metálicos o (b) sólo por estructuras orgánicas formando una malla conductiva, tal como se muestra en la Figura 3.

Cabe anotar que las biogeobaterías comparten los mismos principios de operación que las células de combustible microbianas de sedimento (SMFC) con varias diferencias, ya que carecen de membrana y han sido configuradas sin la adición de mediadores y sustancias diferentes a las naturalmente encontradas en el sedimento o sustrato utilizado.

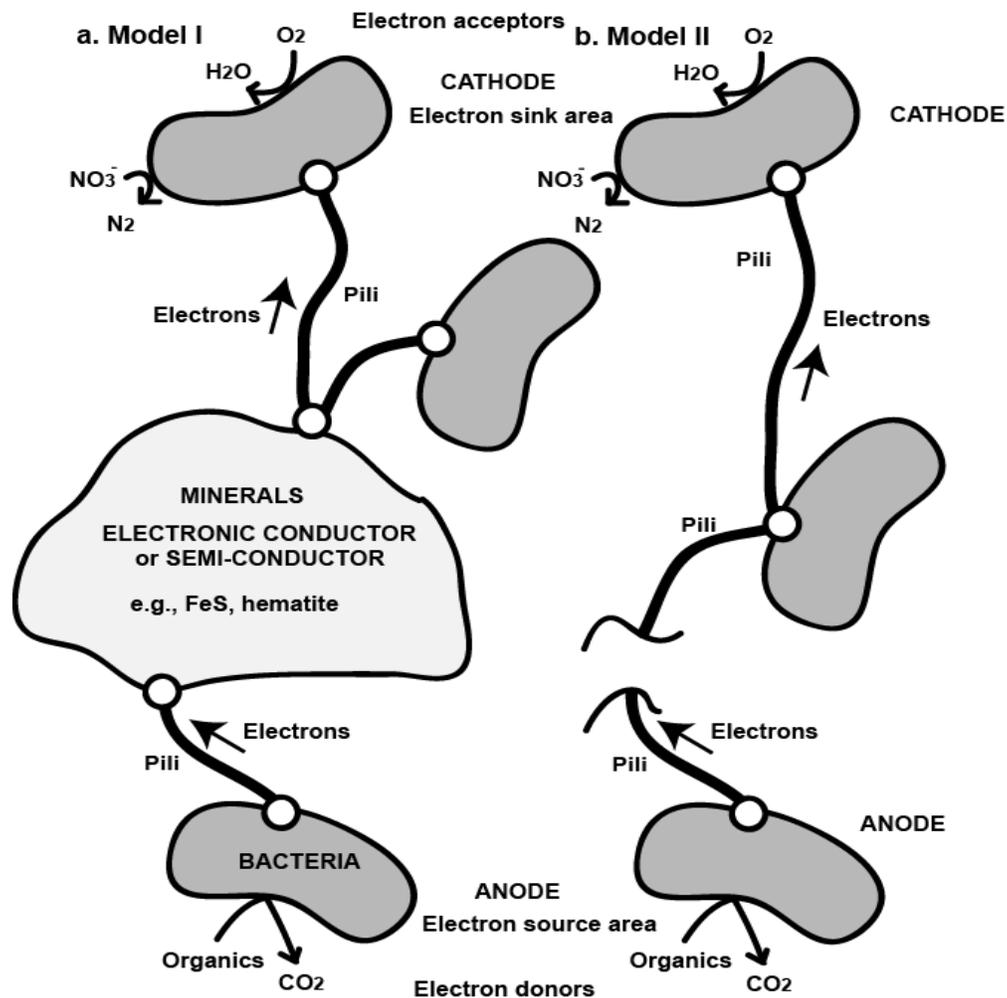


Figura 3. Dos posibles modelos de transferencia de electrones en una pluma contaminante. a) modelo I, la presencia de minerales facilita el envío electrónico. b) En el modelo II las bacterias se conectan por conducción del pili

Fuente: (Naudet *et al*, 2003)

A pesar de los diversos avances en la ciencia ecológica, aun persisten múltiples interrogantes sobre el funcionamiento de los ecosistemas y las formas de gestión sustentables de los mismos (Alvarez y Velazquez, 2013). Dado que un ecosistema es un sistema muy complejo no es una tarea fácil encontrar buenos indicadores para dar información sobre su integridad (Jorgensen y Svirezhev 2004). Estos mismos autores proponen el uso de los principios termodinámica para explicar el crecimiento y desarrollo de los sistemas ecológicos, sin embargo la segunda ley en este campo revela nuevos escenarios para comprender los sistemas biológicos en donde el almacenamiento de exergía es de crucial importancia para la evolución de la vida en diversidad y complejidad (Wall y Gong, 2001).

2.4.1. Baterías de suelo (*earth battery*)

El suelo es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Tales conceptos abarcan lo biótico y abiótico en una dinámica fluctuante en un contexto socioeconómico (FAO, 2017). Compartiendo muchas similitudes con las celdas de combustibles, especialmente las sedimentarias y con plantas en cuanto a principios de operación, las baterías que se construyen con suelo como constituyen una forma de energía libre, natural y gratuita (Ryeczek, 1984).

Patentes como la US155209A, 1874, US182802A, 1876, US329724A ,1885 y US495582A, entre otras, definen las baterías de tierra como un par de electrodos hechos de dos metales diferentes, como el zinc y el cobre que están enterrados en el suelo o inmersos en el mar. En otras palabras, la tierra y el agua de mar funcionan como un electrolito en medio de dos metales diferentes. En lugar de usar una batería química, se descubrió que se puede obtener energía del suelo de forma natural como se muestra en la figura 4.

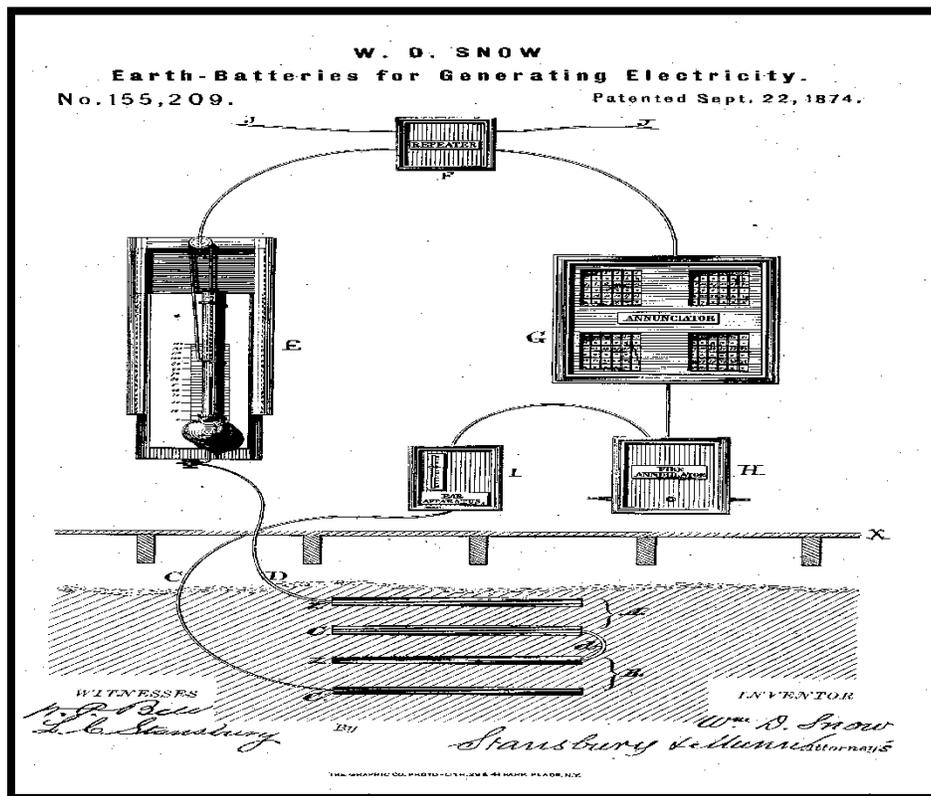


Figura 4. Batería de tierra Patente No. 155,209, fechada el 22 de septiembre de 1874

Fuente: el autor

2.5 Metodos

2.5.1 Método oxidación con peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno se encuentra en bajas concentraciones (3 - 9 %) en muchos productos domésticos para usos medicinales y como blanqueador de vestimentas y el cabello. En la industria, el peróxido de hidrógeno se usa en concentraciones más altas para blanquear telas y pasta de papel, y al 90% como componente de combustibles para cohetes y para fabricar espuma de caucho y sustancias químicas orgánicas. En otras áreas como en la investigación se utiliza para medir la actividad de algunas enzimas como la catalasa. También puede causar combustión espontánea al entrar en contacto con materia orgánica o algunos metales, como el cobre, la plata o el bronce (Barroso, s.f., párr. 1-2)

2.5.2 Método Munsell

El color es, probablemente, la característica más evidente cuando se observa la superficie o el perfil de un suelo y constituye su respuesta a la radiación electromagnética en la región visible del espectro. Es, además, una característica muy utilizada por el edafólogo para obtener información sobre la génesis del suelo y sobre sus propiedades físicas y químicas. (Torrent, 1978 como se citó en MOESA, 2013, párr. 11)

Vale destacar que la medición del color del suelo se realizó utilizando una muestra, bajo dos condiciones: seco y húmedo, identificando la condición física de la muestra (agregado de suelo separado, friccionado, triturado o triturado y alisado). La figura 18 muestra la forma como se analiza el suelo en donde se utilizan dos parámetros: a) el color Munsell y b) la notación Munsell. El color del suelo es indicativo de muchas propiedades de este. Si el color del suelo varía de un lugar a otro, seguramente, los minerales que componen uno y otro no son los mismos o el contenido en agua de ambos es diferente. El color generalmente representa el contenido de materia orgánica, mientras más oscuro sea el suelo decimos que contiene mayor cantidad de materia orgánica (M.O). Los científicos utilizan la escala de colores de Munsell para clasificar los suelos (Vasco, 2015). Por lo general, el color se desarrolla por la cantidad y estado de óxido-reducción del hierro y/o de la concentración de la materia orgánica (Sánchez, 2005).

Esta técnica ofrece las siguientes ventajas: muy importante para la taxonomía de suelos, indica presencia de compuestos químicos, refleja rasgos ambientales.

Resulta pertinente destacar que a las muestras de sedimentos recolectadas se les analizaron los atributos del color tono (hue), valor (value) y saturación (croma), los cuales se especifican con las iniciales HVC y se expresan con la llamada notación de Munsell de la forma HV/C. como se muestra en la Figura 5.

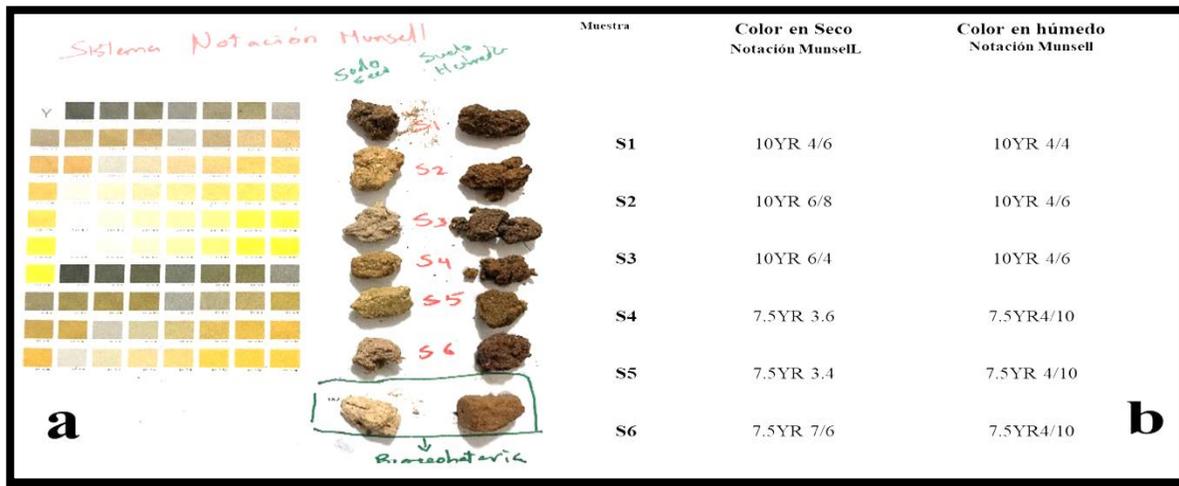


Figura 5. Método Munsell para clasificación de suelos

Fuente: Munsell.

2.5.3 Método del potencial espontáneo (*self-potencial* o *spontaneous potential*)

Entendiendo la bioelectricidad como un fenómeno eléctrico natural generado por organismos vivos, se utilizó el modelo de biogeobaterias fundamentado en el metodo geofísico de potencial espontáneo (SP), que corresponde a medidas de potencial eléctrico observadas en la superficie terrestre (Corwin, 1990), las cuales ocurren naturalmente y su medición se puede realizar con un electrodos no polarizables, conectados a un voltímetro. El potencial eléctrico, en este caso, es concebido como generado por fuentes de corriente en el sustrato terrestre que se originan en procesos naturales que involucra flujos acoplados, en los que gradientes de un potencial primario (presión, temperatura o electroquímico) imprimen un flujo de cargas eléctricas en el sustrato. Se produce así, una polarización del medio y, consecuentemente, un potencial eléctrico medible en superficie (Sill, 1983)

Es un método de prospección eléctrica que tuvo sus orígenes en la búsqueda de recursos minerales, y su uso se amplió al mundo de la ingeniería civil y medioambiental, resultando ser una herramienta eficaz en el análisis de problemas de filtración de aguas en el subsuelo. Se basa en medir entre dos puntos del terreno, cual es la diferencia de potencial eléctrica generada de forma natural en el subsuelo. [...] El origen de estos campos eléctricos naturales (potenciales espontáneos) está asociado a diferentes fenómenos como por ejemplo a las variaciones de las propiedades del terreno (cambios de humedad, de su química, entre otros), la presencia de cuerpos metálicos, actividad biológica de la materia orgánica, entre otros. (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f., p. 31)

2.5.4 Método Columna de Ambientes Microbianos Winogradsky

Las columnas de Winogradsky son ecosistemas microbianos modelo preparados, mediante la adición de sedimentos de estanques a un cilindro transparente con suplementos adicionales e incubados con luz. Los gradientes ambientales se desarrollan dentro de la columna creando diversos nichos que permiten el enriquecimiento de bacterias específicas. El cultivo de enriquecimiento se puede utilizar para estudiar la estructura y la función de la comunidad microbiana del suelo y los sedimentos (Estéban et al., 2015).

Es una representación de ecosistema anaeróbico microbiano simple, en donde se pueden estudiar fácilmente los ciclos biogeoquímicos, las relaciones y diferencias entre diferentes tipos de microorganismos de distintas comunidades y metabolismos energéticos; además permite observar cómo los microorganismos altamente específicos ocupan micro espacios dependiendo de sus necesidades de supervivencia y reproducción, como sus requisitos de carbono, energía y oxígeno. Esta simulación de ecosistema, solo requiere de energía lumínica para su mantenimiento, es autónomo y completamente autoreciclable (Moreno, 2012 como se citó en Gonzales, Toro, Contreras, Ramírez, y Ruiz, s.f., p. 2)

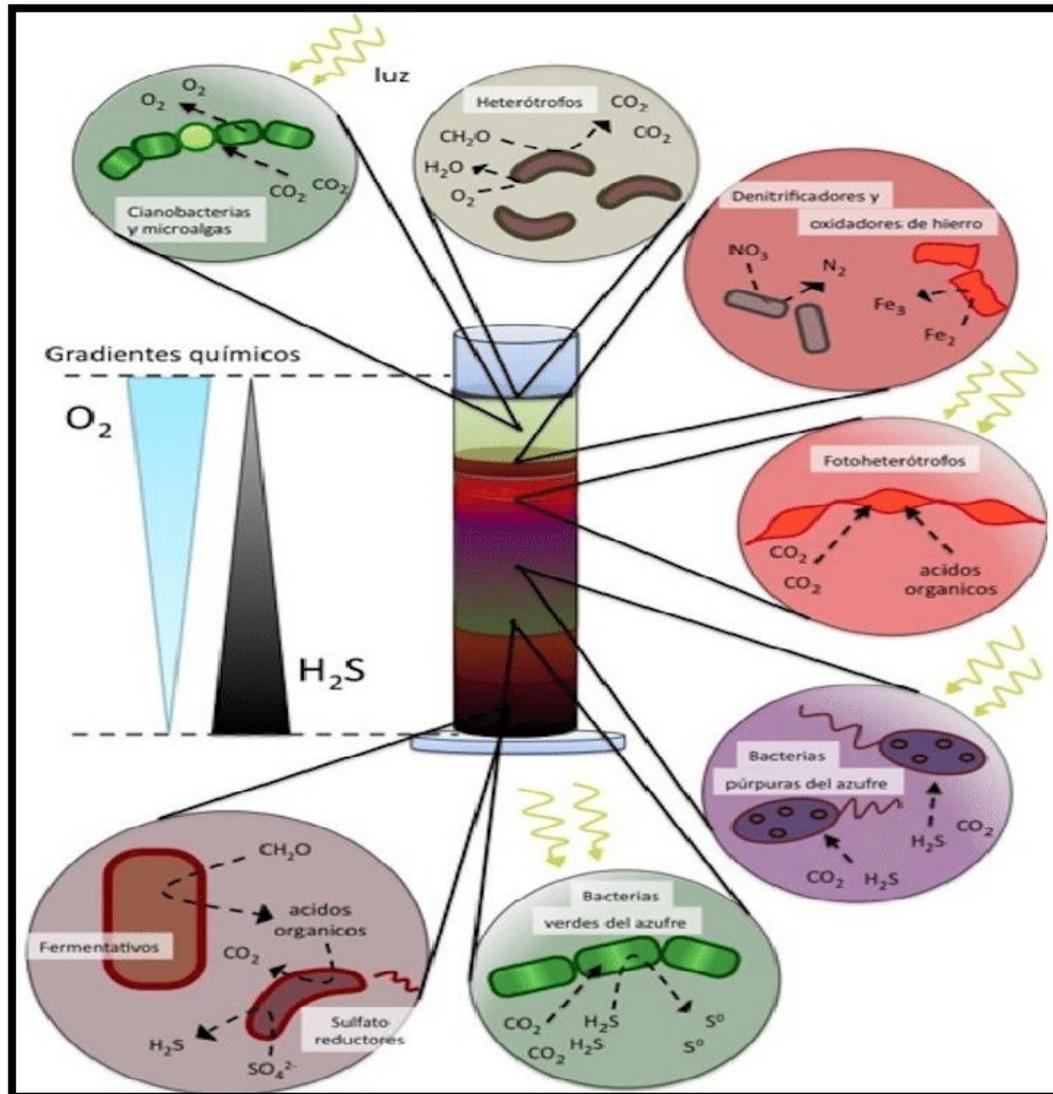


Figura 6. Columna de Winogradsky
 Fuente. Barroeta y Esteve-Núñez, 2015.

Igualmente, el montaje de columna de Winogradsky se hizo en botellas plásticas con capacidad de dos litros, a los cuales se les adicionaron muestras de sedimentos provenientes de las zonas aluviales con influencia de aguas residuales no caracterizadas (Gonzales et al., 2012). Estos fueron incubados en exposición a la luz natural sin adicción de materia organica externa hasta la aparición de una especie de una sucesión de microbiológica que “después de 3 o 4 semanas [...] se establece en diferentes partes de la columna de acuerdo a sus características fisiológicas” (Santos, 2009a; Moreno, 2012a como se citó en Gonzales et al., s.f., p. 3).

2.6 Teoría General de Sistemas

La Teoría General de los Sistemas fue concebida originalmente para explicar fenómenos biológicos y sirvió de base para promulgar el enfoque sistémico con su perspectiva holística en contraposición de las formulaciones mecanicistas tradicionales que veían el mundo y su realidad como compuesto de partes separadas (Bertalanffy, 1976). Para el estudio de los sistemas en general se ha desarrollado lo que se conoce como metodología sistémica, o conjunto de métodos mediante los cuales abordar los problemas en los que la presencia de sistemas es dominante. En realidad, la metodología sistémica pretende aportar instrumentos con los que estudiar aquellos problemas que resultan de las interacciones que se producen en el seno de un sistema, y no de las partes del sistema consideradas aisladamente.

2.6.1 Dinámica de sistemas

La Dinámica de sistemas es una metodología que permite modelar el comportamiento de un sistema, mostrando elementos como variables y ciclos de retroalimentación que se generan por la interacción de las mismas variables, se basa en la elaboración de un modelo que explique el comportamiento de un sistema a través del tiempo; comportamiento que surge gracias a estructura y el relacionamiento de las variables allí modeladas. (Cano, 2017).

2.6.1.1 Diagrama causal y pensamiento operacional

Los diagramas causales son una herramienta útil en dinámica de sistemas, permiten ilustrar la estructura de realimentación del sistema, sirven de guías para la elaboración y comprensión de los modelos.

Barry Richmond (1993) acuñó la expresión pensamiento operacional con el propósito de entender un sistema a partir de su funcionamiento. Al considerar las comunidades bacterianas como un sistema social donde los microorganismos según sus capacidades metabólicas responden a diferentes estímulos del entorno, resulta importante comprender cómo la estructura determina el comportamiento, brindando una base para entender simultáneamente la influencia del tiempo en la evolución de un sistema.

2.7 Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible constituye un concepto de actualidad y para entenderlo es necesario comprender la globalización y los problemas contemporáneos de la humanidad, inmersa en múltiples crisis de diversa naturaleza. La definición más ampliamente conocida para este concepto es la que sostiene que debe satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias (Brundland, 1987 como se citó en Velásquez y D´Armas, 2015), concepción que fue adoptada ampliamente desde la Cumbre de la tierra de Río en 1992.

Este planteamiento ha evolucionado en el tiempo sin perder su esencia, pero haciendo énfasis en una transición hacia un enfoque más holístico que toma en cuenta lo económico, lo social y lo ambiental de manera integrada. El desarrollo sostenible plantea el reto de incluir en sus líneas de acción, la prevención y control de la degradación ambiental, a través del fortalecimiento de instrumentos que atiendan de manera directa sus principales causas, “como son la contaminación del agua, del aire, la afectación de la flora y fauna, la generación de residuos y demás factores que afecten la calidad de vida de las comunidades” (Quintero, Agudelo, Quintana, Cardona, y Osorio, 2010, p. 53).

Se conocen 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) promovidos por la ONU, en el caso específico de la presente investigación se realizó un **“Estudio sobre la Bioelectroremediación como Alternativa Bioelectrotecnológica para la Sostenibilidad Ambiental en el Departamento Del Chocó”**, donde se tienen en cuenta dos de los 10 ODS sugeridos por La Red De Soluciones de Desarrollo Sostenible (SDSN por sus siglas en inglés), a saber: “ODS 8: frenar el cambio climático inducido por el hombre y garantizar energía sostenible para todos.

ODS 9: Garantizar servicios y biodiversidad del ecosistema, así como una buena gestión de los recursos hídricos y otros recursos naturales” (Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible [SDSN], 2013, p. 9)

Estos Objetivos de Desarrollo Sostenible representan una carta de navegación o marco regulatorio que promueve acciones universales teniendo en cuenta las distintas realidades y capacidades nacionales y locales. Entender esta complejidad sistémica del desarrollo sostenible es también un aspecto fundamental para poder encontrar estrategias o alternativas de solución a los

problemas que afectan el equilibrio del planeta. Cabe resaltar que no existen soluciones únicas y que por lo tanto, la visión normativa es una guía útil para definir los caminos posibles en una sociedad preocupada por el bienestar y el buen vivir.

[Este] ‘buen vivir’ apunta a una ética de lo suficiente para toda la comunidad y no solamente para el individuo; supone una visión holística e integradora del ser humano, inmerso en la gran comunidad terrenal, que incluye no solo al ser humano, sino también el aire, el agua, los suelos, las montañas, los árboles y los animales; es estar en profunda comunión con la Pachamama (Tierra), con las energías del Universo, y con Dios. (El Nuevo Diario, 2009, párr. 6)

En ese orden de ideas, la investigación en cuestión se desarrolló con el propósito de establecer o incorporar el concepto de biogeoelectrosistemas como una perspectiva para el conocimiento y aprovechamiento de ecosistemas, los que en este caso están representados en los contaminados a causa de vertidos que por lo general no son monitoreados con la efectividad necesaria, dadas las limitaciones económicas, logísticas y operacionales que se presentan en contextos como el de referencia. Este último punto es de suma importancia puesto que deja en claro que el contexto es el escenario que define el accionar, permitiendo regular las interacciones complejas y no lineales que existen entre los sistemas naturales y humanos (Sachs, 2016). Por su parte, las biotecnologías electrogenicas se proponen como aquellas tecnologías que se fundamentan en los mecanismos y procesos biológicos de naturaleza eléctrica que contribuyen en el alcance de la sostenibilidad ambiental, desde una perspectiva bioeconómica que consiste en replicar procesos y principios biológicos para el desarrollo de tecnologías inspiradas en la naturaleza como lo afirmó Benyus (1997). Un discurso similar lo expone la economía azul cuando se refiere a la aplicación de principios de la física, química y biología, tal como aparecen en los ecosistemas, lo cual también corresponde con el paradigma bioeconómico. Este último concepto sale a relucir como una alternativa ante la necesidad de establecer estrategias que minimicen o eliminen desechos y que promuevan el uso sostenible de recursos biológicos. En este sentido, las biotecnologías electrogénicas, constituyen estrategias de desarrollo bioeconómico dentro de las que se encuentran las biotecnologías grises, cuyo objetivo es darle solución a problemas ambientales avanzando en la reducción de la economía basada en el carbono y posicionarse como una economía basada en el consumo y producción de bienes y servicios derivados del uso directo, y la transformación

sostenible de recursos biológicos y de los desechos biomásicos que se generan en los procesos de transformación, producción y consumo.

Aunque las aguas residuales son un residuo líquido, vistas desde la perspectiva bioeconómica, se convierten en un recurso y por su parte los entornos contaminados por estas pueden albergar oportunidades científicas, tecnológicas y socioambientales. En este caso, a partir de la experiencia de analizar el comportamiento bioeléctrico de sedimentos provenientes de zonas aluviales con influencia de aguas residuales se pudo entender que la naturaleza trabaja con electricidad en muchos de sus procesos, lo cual se puede demostrar a través de las señales eléctricas espontáneas que se pueden detectar fácilmente. Un ejemplo de ello lo constituyen los microorganismos que presentan la capacidad metabólica de producir, consumir y conducir electricidad, pero muy pocos generan una cantidad considerable de energía para que pueda aprovecharse (Mohn, 2017).

En el marco del desarrollo sostenible es pertinente determinar: beneficios económicos y sociales, oportunidades científicas y tecnológicas, contribución a la obtención de objetivos energéticos y medioambientales, entre otros aspectos que a través de las bioelectrotecnologías en el marco del paradigma bioeconómico pueden llegar a ofrecer. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis contextual y proyectivo con el objetivo de proponer estrategias en el marco de las bioelectrotecnologías para darle solución a problemáticas en torno a la contaminación ambiental pero desde una perspectiva bioeconómicas en donde la naturaleza ofrece el manual de operaciones para el desarrollo de las mismas. Las características de este análisis fueron: (a) el contexto, (b) el problema como oportunidad, (c) tendencias científico-tecnológicas y (d) visión holística.

El departamento del Chocó es un territorio de contrastes especiales, en donde a pesar de las bondades ofrecidas por la biodiversidad se presentan serios problemas ambientales que comprometen la estabilidad de estos recursos. Una evidencia de este panorama está enmarcado en la Sentencia T-622 de 2016 dada a conocer en mayo de 2017, donde se reconoció al río Atrato como sujeto de derechos, con miras a garantizar su conservación y protección. En este sentido, en Quibdó-Chocó el 24 de octubre de 2017, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) junto con el Instituto de Investigaciones Ambientales de Pacífico (IIAP) y la Corporación para el desarrollo sostenible del Chocó (CODECHOCÓ) instalaron un Comité Técnico para la

descontaminación del río Atrato, lo que significa que existe una gran necesidad de encontrar mecanismos que así lo permitan.

De otro lado están todas las problemáticas ambientales referidas en capítulos anteriores que dan un marco de necesidades para atender desde la perspectiva propuesta, la cual se centra en revelar las dinámicas eléctricas escondidas en los ecosistemas. En la región es un tema poco o nada conocido o estudiado; empero, se considera como un campo prometedor que permite proyectar los beneficios de la electricidad natural en diferentes aplicaciones. Una de estas posibles aplicaciones está relacionada con la descontaminación de ambientes, aprovechando las capacidades biodegradativas de microorganismos presentes en estas mismas zonas. La gran novedad radica en que con el descubrimiento de la capacidad de generar, conducir y consumir electricidad, el ecosistema se convierte en un escenario que debe verse desde otra perspectiva.

De acuerdo con Lastres y Albagli (1999) como se citó en RODAS (s.f.): “Existen tres elementos que caracterizan el desarrollo de un nuevo paradigma: amplían las posibilidades de aplicación de nuevas tecnologías, **pueden ser** de demanda creciente, **posibilitan la** disminución creciente del costo unitario de producción” (párr. 2; en negrita palabras propias del autor) y constituyen una nueva perspectiva para estudiar y aprovechar ecosistemas. Considerando un enfoque holístico que permite acercarnos al “todo”. La teoría general de sistemas de von Bertalanffy (1976) se trata, en definitiva, de reemplazar el esquema de causalidad linear o de dirección única por una visión orgánica del «*mundo como una gran organización*».

A lo largo del siglo 20, desde distintas disciplinas, emergió con rigor científico el pensamiento sistémico. Entre los principales autores se podría destacar a Oparín (origen de la vida), Prigogine (sistemas disipativos), Wiener y Shannon (cibernética y teoría de la información), Bateson (mente y naturaleza), Odum y Margalef (ecología), Maturana y Varela (autopoeisis y neurobiología), Gleick (teoría del caos), Mandelbrot (geometría fractal), Lovelock (hipótesis Gaia), Capra (el tao de la física y teoría de la complejidad). De modo especial este último autor ha presentado una síntesis comprensiva del conjunto del pensamiento sistémico. (Galán, 2016, párr. 24)

Al igual que los anteriores, la biogeoelectricidad también constituye una representación de esta corriente holística. Este enfoque holístico permite superar limitaciones que se derivan de la perspectiva reduccionista que domina con fuerza el ejercicio científico. Estudiar el entorno es una

actividad de profunda observación que debe hacerse desde una perspectiva integradora como la que se aplica desde la teoría de sistemas. No obstante y tal como lo estableció Reyes (2012), existe una gama de fenómenos que investigar que probablemente ocasione el nacimiento de un nuevo paradigma como lo es en este caso. Tecnológicamente hablando, se requiere un cambio que conlleve al desarrollo de tecnologías orientadas a proporcionar energía, transporte, construcción, alimentación, sanidad, educación entre muchas otras cosas de forma sostenible. “Llamamos *Paradigma Tecnológico* el conjunto de conocimientos y técnicas que permiten un determinado dominio del medio natural y de producción de bienes y servicios. El concepto de paradigma significa que cada cultura está construida sobre una plataforma tecnológica diferente” (Ángel, 1996 como se citó en Ramos, 2015, p. 172).

A través de una columna de Winogradsky se pudo registrar actividad biogeoeléctricas en las que intervienen microorganismos con diferentes roles sobre un entorno metabólicamente electroactivo. Las plantas juegan un papel importante en la generación de energía, dado que depositan materia orgánica por medio de la rizodeposición, convirtiéndose en un electrolito con potenciales de interés. Desde el punto de vista tecnológico, comercialmente existen dispositivos que operan con el principio biogeoeléctrico, lo cual sirvió de referente para la construcción de dos prototipos simplificado y a bajo costo, siguiendo el modelo determinado principalmente por el sustrato, la especie vegetal y la configuración de las celdas, el cual a diferencia de otros no incorporó membrana en su estructura. Además, el fenómeno de bioelectrorremediación ofrece la posibilidad de utilizar electricidad biológica para la descontaminación de suelos y aguas. A partir de aquí se abre un campo amplio de investigación para responder nuevas inquietudes en relación a la influencia de la bioelectricidad espontánea en procesos de remediación ambiental. Desde el enfoque biogeoelectrosistémico, la energía no se destruye sino que se transforma, por lo tanto:

- Al hablar de energía en los ecosistemas también se hace referencia a un tipo de electricidad que es producida por la energía química presente en sustratos orgánicos, a través de la actividad biocatalítica.
- Las principales protagonistas en la actividad electroecosistémica son las bacterias.
- Se conoce muy poco sobre la dinámica electrogeneradora en los ecosistemas.
- El sedimento de zonas aluviales con influencia de aguas residuales puede verse como un electrolito con valor de uso.

- Aunque los potenciales eléctricos de los sedimentos y sustratos son bajos, permiten el aprovechamiento en dispositivos tipo biogeobaterías con la capacidad de encender un led y además pueden operar como biosensores para el rastreo eléctrico de sustancias.
- Las aguas residuales pueden considerarse como un recurso aprovechable desde el punto de vista bioeconómico.
- La electricidad ecosistémica influye en la cinética de contaminantes y en la dinámica de los sistemas biológicos.

Finalmente, haciendo referencia a la experiencia realizada y a la literatura consultada se puede decir que es posible estudiar la Bioelectroremediación a partir de la dinámica bioeléctrica, por medio de métodos geofísicos como el método de potencial espontáneo (SP) o autopotenciales, con el cual es posible medir en un punto determinado la presencia de actividad eléctrica. Con base en las problemáticas que tiene el departamento del Chocó, las alternativas biotecnológicas (Bioelectroremediación y bioelectricidad) ofrecen un escenario para la introducción en un paradigma bioeconómico que permite ver el problema de la contaminación por aguas residuales en los sedimentos como una oportunidad. Esta investigación promueve el desarrollo de un nuevo paradigma ecoelectrosistémico que integra principalmente los aportes de (Mohan, 2018; Nakamura, 2015; Mendonca, 2016; Marjolein, 2012; Strik et al., 2008 como se citó en Goto et al., 2015; Logan et al., 2006).

2.7.1 Sostenibilidad Ambiental

Una de las metas establecidas en la agenda 2030 indica que de aquí a 2020, se debe proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos, lo anterior enmarcado en uno de los objetivos de desarrollo sostenible que orienta a: “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. En este sentido por medio de las biotecnologías para la remediación de sitios impactados que se han encontrado (Moosavi y Seghatoleslami, 2013), es posible contribuir en la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y sus servicios como lo establece una de las metas del ODS 15.

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, la presente es una investigación holística que integra varias técnicas y estrategias metodológicas para su desarrollo a partir de la inter y transdisciplinariedad (Ramírez, 2016), desde la sustentabilidad según Petschel-Held (2004) como se citó en Rodríguez, Rico, Gutiérrez y Albarrán (2015), busca establecer categorías de análisis: descriptiva, normativa e interactiva para el enfoque propuesto (Vélez, 2016). “Este tipo de investigación produce conocimiento sobre los objetivos de investigación traducidos en soluciones que permiten transformar los efectos y procesos indeseados” (Rodríguez *et al.*, 2015, p. 16); contrario a la investigación científica tradicional, su lugar de acción no es el laboratorio. De manera general, se puede decir que se aplicaron los siguientes tipos de investigación en consonancia con los objetivos planteados (ver Tabla 5):

Tabla 5. Tipo de investigación con relación a los objetivos y variables

Objetivo/Producto	Tipo de investigación	Variables
Objetivo general	Investigación Holística	
(Obj. 1 y 2) Bioelectrorremediación	Teórico / Exploratoria (Reyes y Bringas, 2006)	Potencial Conductividad Eléctrica Presencia/ausencia de Materia Orgánica
(Obj. 3) Biogoelectrosistemas	Transdisciplinar (Petschel-Held, 2004 como se citó en Rodríguez et al., 2015)	Actividad Biológica Actividad eléctrica
(Obj. 4) Prototipos demostrativos Biogobaterías	Sistémica y Tecnológica (Espinoza, 2010; De La Cruz, 2016)	Voltaje Densidad de potencia Color del sustrato Humedad

Fuente: el autor.

3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis es la biogeobatería construida con electrodos inertes de grafito para la generación de señales de autopotencial a partir de sedimentos como posible indicador ambiental en el estudio de la Bioelectroremediación.

3.3. Población

La población de estudio en la investigación es el sedimento de zonas aluviales con influencia de aguas residuales no caracterizadas.

3.4. Contexto geográfico

Debido a que Colombia está localizada entre las zonas intertropical y ecuatorial se le considera un país húmedo y cálido en el 80 % del territorio, mientras que el otro 20 % es seco. Al ser “mayoritariamente húmedo, el exceso de precipitación lava o lixivia las bases que están en el suelo y cationes tales como calcio, magnesio, potasio y sodio, dejándoles condiciones ácidas” (Malagón, 2002, p. 82).

[...] La mayoría de los municipios del departamento del Chocó, se ubican en las llanuras de inundación de los ríos, en sitios donde varias quebradas y ríos emergen de las cordilleras (ríos Atrato, Cabí, Tanando, Tutunendo, Samurindó, Ichó, Pandó, caño Caraño, Quebradas La Yesca, La Cascorva, entre otros) (Maturana, 2007, p. 25). Según el IGAC-INGEOMINAS en el departamento de Chocó existe aproximadamente 88 tipos de suelos.

Los suelos aluviones en todo el Chocó son muy semejantes, tienen propiedades y características similares y pueden distinguirse aluviones recientes, antiguos y medios, según sea su edad, aluviones arenosos, limosos, de acuerdo con el material que en ellos predomine, aluviones amarillos, grises, negros y aluviones inundables bien drenados (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2013, p. 108).

Según la clasificación ecológica de Holdridge (1978), el municipio de Quibdó, capital del departamento, se encuentra ubicado en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T), con temperatura media anual de 28° C, humedad relativa de 89 % y precipitación media anual entre

5000 mm y 7000 mm. Es importante mencionar que en la ciudad Quibdó, la situación geológica se ubica en la Cuenca del Atrato, y se trata de depósitos sedimentarios acumulados desde el Paleógeno sobre diferentes basamentos cretácicos.

Según el Mapa Geológico de Colombia de INGEOMINAS (2007), el municipio se encuentra localizado en las formaciones geológicas: **Cuaternario (Qal)**, depósitos de origen aluvial que se encuentran en el valle del río Atrato. “En general son gravas, limo-arenosas, con cantos de rocas ígneas intrusivas y volcánicas, capas de arenas y sedimentos finos en general con presencia orgánica” (Constructora Davinci, 2016, p. 13) y **Formación Munguidó (Tpm)**:

[Que] consiste principalmente de lodolitas calcáreas de color gris oliva, con algunos niveles piroclásticos de tobas e intercalaciones de niveles delgados de areniscas con glaucomita. Sobre esta secuencia sedimentaria se depositaron sedimentos provenientes de los procesos de sedimentación generados por la dinámica del río Atrato principalmente, sobre estos sedimentos está asentada gran parte del municipio de Quibdó. (Constructora Davinci, 2016, p. 14)

Además, estas zonas aluviales de naturaleza pantanosa presentan:

Inundaciones permanentes o periódicas, que determinan áreas de subpaisajes o unidades de vegetación de acuerdo con el grado, frecuencia y duración de las inundaciones. Estas a su vez pueden subdividirse en categorías más específicas con base en su composición florísticas y el grado de intervención (Rangel, 2004 como se citó en Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC], s.f., p. 24).

Aunque la sedimentación de los ríos es un fenómeno natural, produce la presencia de sedimentos (Martínez-Santos, Probst, García-García, y Ruiz-Romera, 2015) que “actúan como sumidero de contaminantes, convirtiéndose muchas veces en fuente bajo ciertas condiciones ambientales como: cambios en la composición del agua o movimiento de los sedimentos debido a crecientes” (Agencia SINC, 2015, párr. 2). Estos sedimentos son de importancia en los ecosistemas acuáticos, puesto que tienen un rol fundamental en la dinámica de los cuerpos de agua y los sistemas de ribera (Restrepo, Ortiz, Otero, y Ospino, 2015).

3.5. Enfoques generales de la investigación

Desde una perspectiva de sustentabilidad, Saval (1999) establece criterios para elegir una técnica de remediación, los cuales competen no sólo a las técnicas de remediación, sino también a las características del sitio. De acuerdo a este mismo autor, la clasificación de de técnicas de remediación con base en su efecto sobre los contaminantes se califica en: retención, filtración y destrucción (Biorremediación, fitorremediación, incineración). Del mismo modo, de acuerdo al principio de funcionamiento las clasifica en: fisicoquímicas, térmicas y biológicas. De acuerdo a lo anterior, la bioelectro remediación, se podría clasificar como una técnica de destrucción biológica.

El estudio de Bioelectroremediación como alternativa biotecnológica para la sostenibilidad ambiental en el departamento del Chocó, centra su atención los aspectos que se presentan en la figura 7.

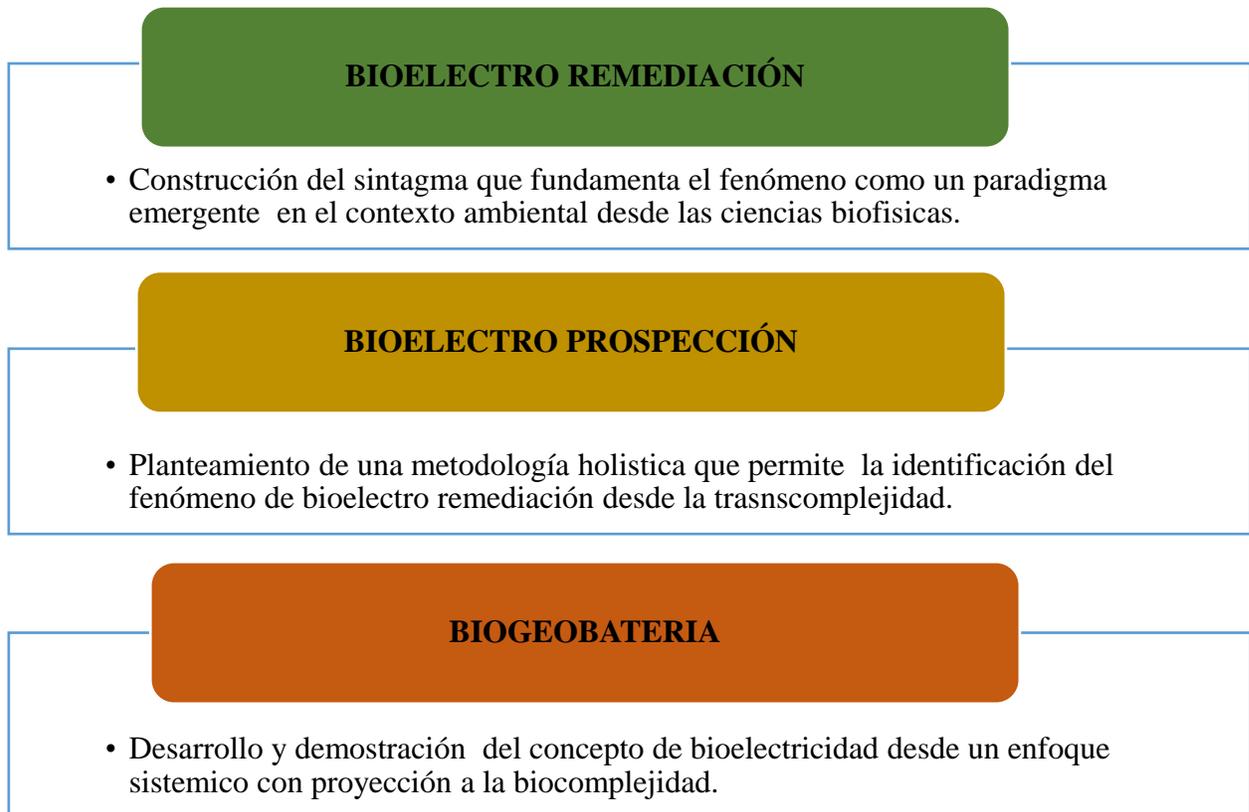


Figura 7. Procedimiento general de la investigación, de acuerdo a los ejes en los que se fundamenta el estudio de la bioelectro remediación.

3.4 Identificación del fenómeno de Bioelectroremediación

Inicialmente se realizó la revisión y análisis del concepto de bioelectro remediación utilizando el modelo de argumentación propuesto por Adam (1992), tal como se expone a continuación:

- **Argumento 0.** Tesis anterior de bioelectrorremediación.
- **Argumento 1.** Hechos y premisas relacionadas con los procesos de biorremediación y electroremediación que hacen parte del proceso de Bioelectroremediación de manera integrada.
- **Argumento 2.** Establecimiento de inferencias. Se relacionan una serie de deducciones soportadas en los hechos y premisas.
- **Argumento 3.** Conclusión. Bioelectroextracción como nueva tesis.
- **Argumento 4.** Restricciones. Excepto si se incumple el principio de conservación de la energía y las leyes del campo biogeofísico como la Ley de Coulomb, campo eléctrico, flujo del campo eléctrico y potencial eléctrico.

Tesis anterior: “La electrobiorremediación es la técnica híbrida que suma los efectos de la electroremediación a la degradación bacteriana de diferentes contaminantes” (Baztan, Pucci, y Pucci, 2015, p. 145)

Hechos (Premisas)

Premisa (a). La electroremediación “se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa” (De La Rosa, Teutli-León, y Ramírez-Islas, 2007, p. 131), y los principales mecanismos por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis (De La Rosa et al., 2007).

Premisa (b). Por su parte, la biorremediación es el uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados y según Noguera-Solís, y Huete-Pérez (2008) como se citó en Fabelo (2017), “existen tres tipos de biorremediación: degradación enzimática [...], degradación microbiana [...], fitorremediación” (p. 55). La biología y la biorremediación tendrán un rol principal en la promoción de la prestación de servicios ecosistémicos por los suelos, sin duda una de las demandas del milenio (MEA, 2005).

Premisa (c). De forma integrada, en la electrobiorremediación ocurren dos fenómenos: biodegradación de los contaminantes o migración de contaminantes.

Premisa (d). Recientemente se ha descubierto la capacidad de las bacterias de transferir electrones a moléculas; un ejemplo de estas son las del género *geobacter* (Lovley, 1991 como se citó en Romero et al., 2012), capaces de transformar internamente energía química en energía eléctrica, transfiriendo electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos (Salgado, 2009).

Premisa (e). Las bacterias degradan materia orgánica y “son capaces de transferir electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales” (Lovley, 2006 como se citó en Pineda y Rosas, 2016, p. 25).

Premisa (f). Son ejemplos de bacterias con capacidad electrogeneradora las que se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. MFC estudiadas con cultivos de bacterias puras inoculadas en corrientes de aguas residuales con sustratos apropiados

Microorganismos	Sustratos	Densidad de potencia (mW/m ²)	Referencia
<i>Shewanella putrefaciens</i>	Glucose	355.5	Logan et al. (2006)
<i>Shewanella oneidensis</i>	Lactate	24	Ringeisen et al. (2006)
<i>Escherichia coli</i>	Complex substrate	600	Zhang et al. (2007)
<i>Pseudomonas sp</i>	Peptone	979	Zhang et al. (2007)
<i>Nocardiopsis sp. KNU</i>	Carboximetilcelulosa	162	Ringeisen et al. (2006)

Fuente: el autor. Con base en Rahimnejad, Najafpour y Asghar (2011)

Premisa (g). El campo eléctrico (en unidades de voltios por metro) se define como la fuerza (en newtons) por unidad de carga (en coulombs). De esta definición, se desprende que la magnitud de un campo eléctrico (**E**) creado por una carga puntual (Q) es: $E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r^2} \hat{r}$ **Ecuación 1**

Premisa (h). Cuando en el espacio existe más de una carga eléctrica, el campo eléctrico total en un punto cualquiera del mismo es la suma vectorial del campo creado por cada una de las cargas en dicho punto (Arboleda, 2009):

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad \text{Ecuación 2}$$

Premisa (i). Por otro lado, se conoce como potencial espontáneo al potencial eléctrico natural que puede existir en un terreno y su origen se le puede atribuir a diferentes fenómenos como por ejemplo a las variaciones de las propiedades del terreno: cambios de humedad, química, la presencia de cuerpos metálicos, actividad biológica de la materia orgánica, entre otros.

Premisa (j). De acuerdo con la primera ley de la termodinámica: “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”. **Energía que entra = energía almacenada + energía que sale.**

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + W_{12} \quad \text{Ecuación 3}$$

Premisa (k). El cambio de entropía de cualquier sistema y su ambiente considerados como un todo, es positivo y se aproxima a cero para cualquier proceso que se aproxime a la reversibilidad... Todos los procesos naturales dan por resultado un incremento de la entropía total. La expresión matemática de la segunda ley es simplemente: $\Delta S_{\text{total}} \geq 0$. La segunda ley afirma que el paso desde un estado A a un estado B sólo es posible si $S_B \geq S_A$ y que es imposible en sentido contrario. En el caso que $S_B = S_A$ es posible pasar tanto de A a B como de B a A, y el proceso se denomina reversible. (Corace, 2010, p. 1)

De acuerdo con esta ley **cada transformación energética conlleva a una degradación, es decir, un aumento de la entropía.** Sin embargo esto solo aplica para sistemas aislados y no para sistemas abiertos y complejos.

Premisa (l). Existen al menos tres formas de definir entropía: 1. En términos termodinámicos, donde se relaciona con el calor (1865) 2. En términos de la teoría estadística, donde se relaciona con el desorden (1875) 3. En términos de la teoría de la información, donde se relaciona la neguentropía (lo opuesto a la entropía) con la información (1940-1950). La neguentropía sería una entropía negativa, es decir, un sistema en donde la energía tiene el potencial de producir trabajo o bien, en un sistema vivo es la entropía que éste exporta para mantener su entropía baja. Es un mecanismo por el cual el sistema pretende subsistir y busca estabilizarse ante una situación caótica.

Premisa (m). En un sistema: a mayor orden más concentrada la energía, menor entropía. A menor orden energía más dispersa, entropía más elevada. En cada transferencia de energía, esta pasa de una forma más concentrada y organizada, a una forma más dispersa y desorganizada. En

un sistema con intercambios y conversiones de la energía que no gana ni pierde energía, la energía potencial del estado final siempre es menor que la energía potencial del estado inicial.

Premisa (n)

Sin lugar a dudas, los potenciales eléctricos de origen electrocinético y redox son los principales contribuyentes de la señal de potencial espontáneo observado en estudios conducidos en superficie (Jardani et al., 2006; Arora et al., 2007). Sin embargo desde el punto de vista ecosistémico el concepto de exergia refleja el grado de desarrollo o complejidad e incluye tanto la energía que puede ser convertida en trabajo (almacenada en la biomasa) como la información biológica que separa a los organismos de su entorno (Jorgensen y Fath, 2004a). Teniendo presente todo lo anterior, se puede inferir lo siguiente:

Aunque se desconoce con precisión la dinámica y la influencia de la bioelectricidad microbiana en el ecosistema, la electricidad generada por los microorganismos por su naturaleza biofísica está relacionada con la teoría de campo eléctrico *donde* la carga ejerce su influencia en el espacio. La unidad de campo eléctrico podría deducirse de la formula en donde una carga de un campo eléctrico E, es afectada por este y se ejerce sobre ella una fuerza F. Si esta carga se desplaza en una distancia “d” entre los puntos A y B en sentido opuesto a la fuerza se habrá realizado un trabajo W, quedando así:

$$W = F * d = Q * E * d \quad \text{Ecuación 4,}$$

ya que: $F = Q * E$ Ecuación 5.

Al manipular la formula se obtiene que: $\frac{W}{Q} = E * d$ Ecuación 6.

La expresión $E * d$ se llama diferencia de potencial entre los puntos **A y B** y se representa como V_{AB} entonces $V_{AB} = E * d$ Ecuación 7. con su presencia modifica las propiedades del espacio que la rodea, la bioelectricidad derivada de la actividad microbiana que manifiesta a través de potenciales espontáneos, podría interpretarse como un indicador de actividad bioelectrorremediativa natural, que se puede entender desde un enfoque totalmente diferente al de electrorremediación y cuyas diferencias se plantean en la tabla 9. Despejando el campo eléctrico se obtiene que: $E = V_{AB}/d$ Ecuación 8 y la Unidad es Voltios /metros.

Tabla 7. *Enfoque convencional versus enfoque propuesto de Bioelectroremediación*

Enfoque convencional de electrobiorremediación	Enfoque propuesto de Bioelectroremediación
Técnica híbrida que suma los efectos de la electrorremediación a la degradación bacteriana de diferentes contaminante.	Técnica que aprovecha la electroactividad microbiana natural sinérgicamente para la degradación de contaminantes.
Utiliza energía externa al sistema.	Utiliza la energía interna del sistema.
Emplea organismos aislados y cultivados.	Emplea organismos nativos en su dinámica natural sin modificación.
Se puede explicar desde el concepto de entropía	Se puede explicar desde el concepto de exergía
No tiene en cuenta el sistema coloidal del sustrato.	El sistema coloidal del sustrato también produce energía.
Se forma por la sumatoria de las partes	Constituye un sistema complejo

Fuente: el autor

3.5 Instrumentos



Figura 8. (a) Computador, (b) medidor de temperatura y humedad ambiental, (c) multímetro, (d) microscopio, (e) estufa, (f) medidor de humedad suelo, (g) medidor de humedad ambiental (f) Medidor de humedad bajo alto, temperatura °C Y F, Ph, luz alto o bajo para

4. DESARROLLO METODOLÓGICO

4.1 Identificación del fenómeno de la bioelectroremediación a partir del modelo de biogeobaterias

Se desarrolló una metodología holística para la propección del fenómeno bioeléctrico, postulandolo como un indicador ambiental que influye estructural y funcionalmente en la vida del subsuelo. La metodología de bioelectroprospección integra principalmente dos vertientes: desde el punto de vista eléctrico se enfoca en la medición de autopotenciales por el metodo de biogeobateria descrito por Mendonça et al (2010) y desde el contexto biológico esta orientado a analizar la diversidad metabólica de los microorganismos presentes en los sedimentos utilizando el metodo de winosgrasky con el que históricamente se ha explicado desde una columna, la ecología microbiana (Madigan, Martinko y Clark, 2010). De forma resumida, se presentan a continuación en la tabla 8, el protocolo seguido en la exploración del fenómeno de Bioelectroremediación.

Tabla 8. *Protocolo para la exploración del fenómeno de Bioelectroremediación*

Pasos	Descripción
Identificación y elección del sitio	Zona aluvial con influencia de vertimiento de aguas residuales.
Medición asistemática de corriente espontánea	Medición de potenciales en la zona aluvial.
Recolección asistemática de sedimentos	Recolección de sedimentos en zona aluvial vegetada por considerarse de mayor contenido de materia orgánica.
Columna de Winogradsky	Representación de estratificación de ambientes microbianos
Montaje de biogeobatería	Dispositivo alimentado con sedimentos aluviales para probar la producción bioelectricidad

Fuente: el autor.

4.1.1 Identificación y elección del sitio

La zona aluvial elegida esta influenciada por la quebrada la Yesca, la cual nace en la parte oriental de la ciudad de Quibdó, en las inmediaciones del barrio El Jardín, en una altura denominada Alto de Granadillo donde hace cabecera común con los Ríos Pando, la Platina, la Cascorva, el Caraño y la Aurora. (Empresas Publicas de Quibdó , 2017)

4.1.2 Medición in situ de corriente espontánea en sedimentos

Se realizó por medio de registros asistemáticos de autopotenciales en el sedimento en condiciones *in situ*.

4.1.3 Medición ex situ de corriente espontanea en sedimentos

Se realizó mediante la medida de autopotenciales con electrodos inertes de grafito a sedimento recolectado. Posteriormente se realizo una prueba para encender un led utilizando dicho sustrato.

4.1.4 Columna de Winogradsky

La columna de Winogradsky (Esteban, Hysa, y Bartow-McKenney, 2015), permitió analizar la actividad biológica del material sedimentario y obtener un perfil básico de los microorganismos fotótrofos anoxigénicos que poseen una gran diversidad metabólica. Este metodo se describe con mayor amplitud en el ítem 3.6.4 de la sección de técnicas e instrumentos.

4.1.5 Montaje de biogeobatería

Se recurrió al método de potencial espontaneo y al modelo de tanque para la generación de señales (SP) modificado. El modelo de tanque para la generación de señales (SP) a partir de biogeobatería no lineal es concebido experimentalmente como aBES (Fachin et al., 2012 como se citó en Revil et al., 2015) como se muestra en la figura 9.

En el montaje de celdas se utilizaron dos electrodos inertes de grafito para la captura de señales de autopotencia, lo cual permitió estudiar la dinámica bioeléctrica en sedimentos como se muestra en la figura 10.

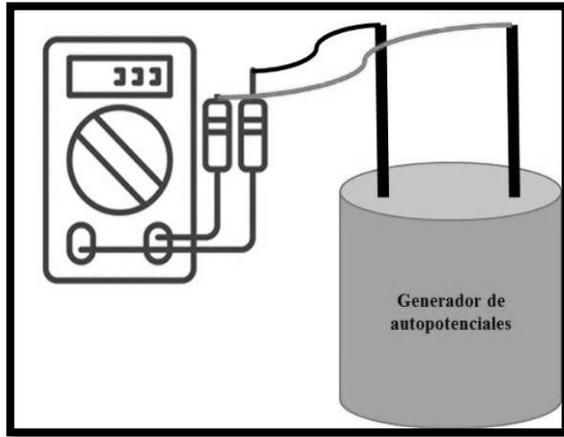


Figura 9. Modelo de tanque para la generación de señales (SP)

Fuente: el autor.



Figura 10. Celda experimental para la generación de señales de autopotencia (SP) con el sedimento configurada con electrodos de grafito en posición horizontal estática.

Fuente: el autor.

Este tipo de sistema trabaja con dos discos de grafito que cumplen la función del ánodo y el cátodo, están enterrados en sedimento y los factores que controlan la amplitud de la anomalía SP incluyen: (a) la capacidad de mantener las reacciones anódica y catódica, (b) la resistencia de la red de conducción de electrones, (c) la separación de ánodo y cátodo y (d) la resistividad del material geológico de fondo.

Además, a partir del análisis bioeléctrico de sedimentos se pudo establecer posibles indicadores de actividad bioelectrorremediadora, asumiendo que:

(a) La ausencia de anomalías (≥ 100 mV) o ausencia de electrones conductores significa que la naturaleza no puede realizar degradación de contaminantes (Revil et al., 2010; Lopes, 2010),

(b) La producción de potenciales aumenta a medida que la materia orgánica se degrada (Buitrón y Pérez, 2011).

4.2 Diseño, construcción y comparación de dos biogeobaterias sencillas y a bajo costo: sedimentaria y sistema con plantas.

4.2. 1 Principio de operación de sistema biogeoelectrico

De forma integral, Bombelli, Rajaraman, Harrison y Howe (2012) relacionaron con mayor detalle los elementos para un montaje de un sistema bioeléctrico, los cuales son: planta, suelo, raíces, bacterias, ánodo, membrana, resistencia, voltímetro, cátodo y electrón mediador. Sin embargo para los fines de la presente investigación se consideró factible construir un prototipo integrado para la demostración del fenómeno bioeléctrico, utilizando como modelo de referencia las baterías de tierra (*earth battery*) que comparten el mismo principio de funcionamiento como se muestra en la figura 11.

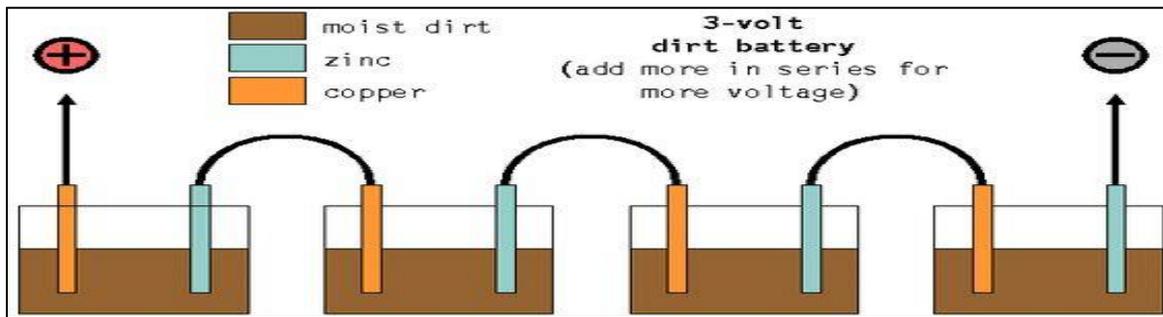


Figura 11. Modelo de pila de tierra multicelular (earth battery). Tomada de <http://www.zetatalc.com/energy/tengy09v.htm>

Por otra parte y teniendo en cuenta a Bombelli (2012) se configuró la composición de sistemas biogeoelectricos desde un un enfoque sistémico como se presenta en la tabla 10.

Tabla 9. Composición de sistemas biogeoelectricos

	Componentes básicos	Funcionalidad dentro del sistema
Sistemas biogeoelectricos	Suelo o sustrato	Sistema condensador electrolítico
	Plantas	Rizodeposición
	Microorganismos	Electrosistema metabólico

Fuente: el autor.

4.2.2 Diseño de sistemas biogeoeléctricos

Se diseñaron dos prototipos artesanales que demuestran los principios de funcionamiento de un sistema bioeléctrico. Tanto el diseño como el montaje se realizó teniendo en cuenta los materiales disponibles localmente, luego se realizó la conexión de celdas en serie o en paralelo según el propósito del prototipo y por último, se llevó a cabo la operación de llenado y conexión terminal a un led.

De acuerdo con Logan et al. (2006), este tipo de dispositivos funciona bajo el principio de bioelectricidad, de manera general se trata de un diseño de pila biológica basado en la asociación de los componentes: suelo, agua y la planta sobre un sistema de electrodos con una configuración específica como se muestra en la figura 12.

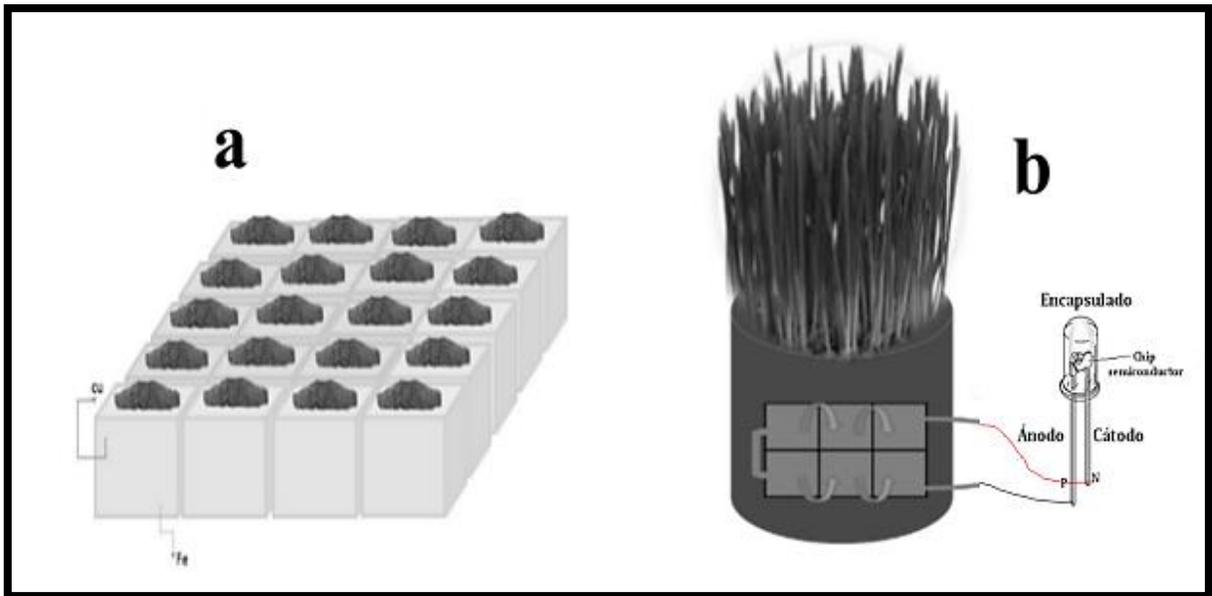


Figura 12. Se muestra en la imagen el diseño a escala artesanal de dos prototipos biogeoeléctricos que funcionan de manera similar a las baterías de tierra. (a) Prototipo sedimentario, (b) prototipo con plantas

Fuente: el autor.

4.2.3 Sistema biogeoeléctrico con sedimentos

Para el montaje de la biogeobatería sedimentaria se obtuvieron muestras de sedimento de 600 gr aproximadamente c/u, extraídas de los primeros 20 cm de profundidad tomando en cuenta lo

reportado por Silva (2004) (ver Figura 13a), pertenecientes a suelos representativos de los puntos de muestreo seleccionados al azar en zonas aluviales (ver Figura 13c) de la quebrada la Yesca en el municipio de Quibdó - Chocó. Las muestras fueron transportadas en recipientes de icopor (ver Figura 13b), para luego someterlas a secado al aire libre y a la sombra, a temperatura ambiente para evitar alteraciones fisicoquímicas, mediante la metodología propuesta por Tan (1996), seguidamente fueron separadas con un tamiz de 2 mm aproximadamente (ver Figura 13d).



Figura 13. (a) Medición de 20 cm de profundidad para recolección de sedimentos, (b) recipientes para la recolección, (c) recolección de sedimentos en zonas vegetadas y (d) tamizaje de sedimento seco.

Fuente: el autor.

El prototipo sedimentario se configuró siguiendo los principios de funcionamiento de las baterías de suelo (*earth battery*) y considerando la configuración del prototipo de planta lámpara desarrollada por profesores y alumnos de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) de Lima, Perú. La biogeobatería con sedimentos se construyó en una placa de plástico con 20 cavidades (cada una con capacidad de 200 ml) como se puede ver en la figura 14a, para una capacidad total de 4 L. Se utilizó como material conductor cobre y malla de hierro interconectadas en serie tal y como se muestra en la figura 14b.



Figura 14. Placa de plástico para el montaje de la biogeobatería con 20 cavidades (a) configuración de electrodos en serie y operación de llenado con el sedimento proveniente de zona aluvial con influencia de aguas residuales (b)

Fuente: el autor.

4.2.4 Sistema biogeoeléctrico con plantas

De igual manera, utilizando los mismos principios de operación que el prototipo de sedimentos se construyó un ejemplar vegetado que demuestra el fenómeno de la generación de biogeoeléctricidad con especies, lo cual presenta similitudes con la metodología propuesta por Gonzales (2017), quien estudió la generación de electricidad con base en la fotosíntesis. Se analizó el comportamiento bioeléctrico de la especie *vetiver* a raíz desnuda desprovista de sustrato y con sedimentos. Se eligió esta especie considerando el conocimiento previo que se tiene acerca de ella, con relación a las capacidades fitorremediadoras que ofrece tanto en suelos como en aguas (González, 2017).

4.2.4. Comparación de prototipos

Los prototipos fueron comparados de acuerdo a su rendimiento bioeléctrico el cual está dado por: “La densidad de potencia (DP) expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang et al, 2010), la cual también puede expresarse en mili watts por centímetro cuadrado [mW/cm^2], o micro watts por centímetro cuadrado [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], siendo equivalentes a $10 \text{ W}/\text{m}^2$ y $0,01 \text{ W}/\text{m}^2$, respectivamente, o la potencia por unidad de volumen del sustrato” (Luo et al. 2010 como se citó en Revelo et al., 2013, p. 20). Del mismo modo, es útil conocer la corriente eléctrica (I) del sistema, la cual se puede calcular en relación a la resistencia (R) y el potencial (V) por medio de la Ley de Ohm.

4.3 Analisis mediante dinámica de sistemas del fenómeno biogeoelectrico

Un modelado basado en la dinámica de sistemas se compone por las variables, sus relaciones y las retroalimentaciones. En razón de lo anterior se construyeron diagramas de causalidad para comprender el sistema y establecer el conjunto de los elementos que permiten explicar el fenómeno observado, utilizando el *Software Stella*.

De acuerdo a Cervantes, Chiapa ,Dias (2009), por medio del programa Stella, es posible representar la complejidad de un sistema utilizando cuatro elementos que se representan por medio de:

- **Stock:** Significa que algo en el sistema se acumula. .
- **Flujo:** Representa las variaciones de lo que esta en el Stock.
- **Convertidor:** Permite establecer una señal de salida que se soporta en el análisis y transformación de dato y/o información de entrada.
- **Conector:** como su nombre lo indica, permite enlazar la información y se utiliza entre el stock y los convertidores.

4.4 Analisis Estadistico

Para determinar el efecto del potencial sobre el factor punto de muestreo, se aplicó un análisis de varianza univariante de un factor (modelo de efectos fijos) que como su nombre lo indica se tiene un factor (punto de muestreo) y una variable dependiente (potencial). Se comprobó la verificación de los opuestos tales como: Homogeneidad de varianza, y normalidad, aplicando prueba de levene, prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors y Shapiro-Wilk Se establecieron las diferencias significativas entre los potenciales de cada punto de muestreo, usando la prueba de Tukey-HSD.

Por otra parte y dado que el potencial fue medido en intervalos no regulares de tiempo, se trazó una gráfica en el plano de potencial versus fecha de muestreo

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Bioelectrorremediación a partir del modelo de biogeobaterias construidas con sedimentos provenientes de zonas aluviales con influencia de aguas residuales.

Pensando desde la metodología de dinámica de sistemas se construyó un diagrama causal sobre la bioelectrorremediación que se muestra en la figura 15 donde se se representa las relaciones de influencia, partiendo del fenómeno de contaminación generado por la mala disposición de residuos orgánicos y el vertimiento de aguas residuales que influyen en las condiciones ambientales de un lugar determinado, afectando la biodiversidad. Por consiguiente, la biomasa microbiana en el ecosistema dependerá de todo lo anterior dando lugar a la generación de biogeoelectricidad como residuo eléctrico. De acuerdo a la tesis que aquí se defiende, esta energía recirculará en el ecosistema indefinidamente en forma de bucles, ejerciendo funciones de regulación en diferentes bioprocesos.

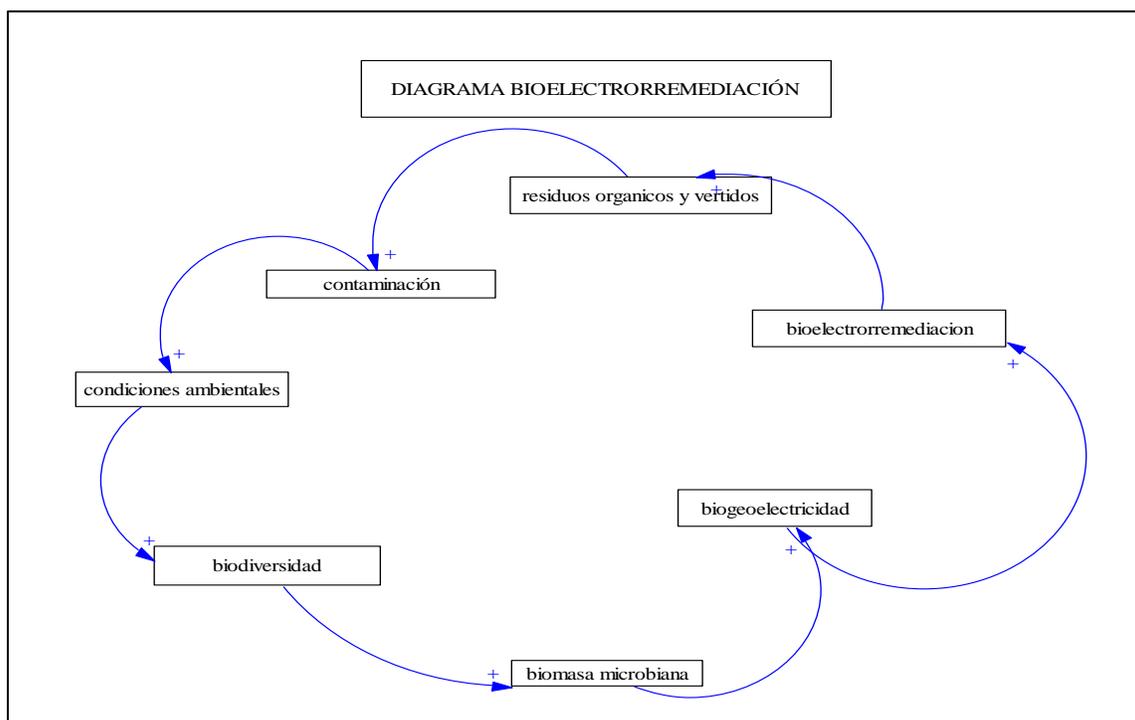


Figura 15. Diagrama causal bioelectrorremediación utilizando el software Vensim Ple

Fuente: el autor.

De manera mas simplificada, un sistema de producción de biogeoelectricidad podría representarse con el modelo operacional que se muestra en la figura 16 donde se representa el suelo como un acumulador en donde ocurren transformaciones que dan lugar a la producción de biogeoelectricidad, magnitud que recircula y retroalimenta el sistema generando y regulando a su vez nuevos procesos en la dinámica del ecosistema.

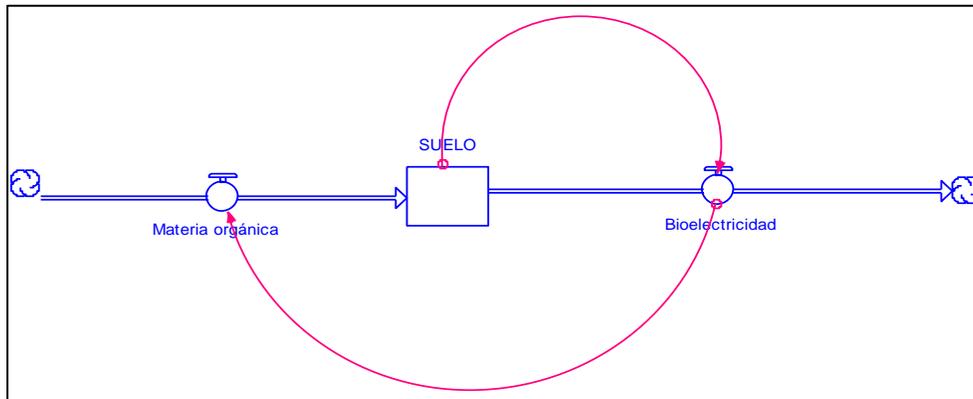


Figura 16. Diagrama de niveles y de flujo sobre la estructura diámnica de un sistema básico de generación de bioelectricidad en el suelo con software Stella

Fuente: el autor.

En un sistema contaminado por materia orgánica se acumulará energía en diferentes formas. Si se tiene en cuenta la electricidad generada por microorganismos electrógenos como producto derivado de la transformación de biomasa (materia orgánica), cambia la forma de entender el ecosistema. La ecuación operacional de la producción de biogeoelectricidad estaría en función la cantidad de microorganismos y de la electricidad estos puedan generar de acuerdo al indicador de productividad preestablecido, lo cual puede representarse planteando: $producción(t) = v * i * ip$ **Ecuación 9**. Este mecanismo a su vez describe un modelo operacional de producción de biogeoelectricidad que da lugar a la pregunta: ¿Cómo se acumula la biogeoelectricidad en el ecosistema?, es por esto que se presenta la biogeoelectricidad en la figura 17 como una variable stock (Bg), su variación en este caso es igual a la producción de la biogeoelectricidad (P) menos la disposición (consumo) de biogeoelectricidad (D). Cabe resaltar que la producción está determinada a su vez por otras variables dentro de las que se encuentra la biomasa (residuos orgánicos y microorganismos electrogénicos).

$$\text{Dicho en otro lenguaje: } \frac{dBg}{dt} = P(T) - D(T) \text{ Ecuación 10}$$

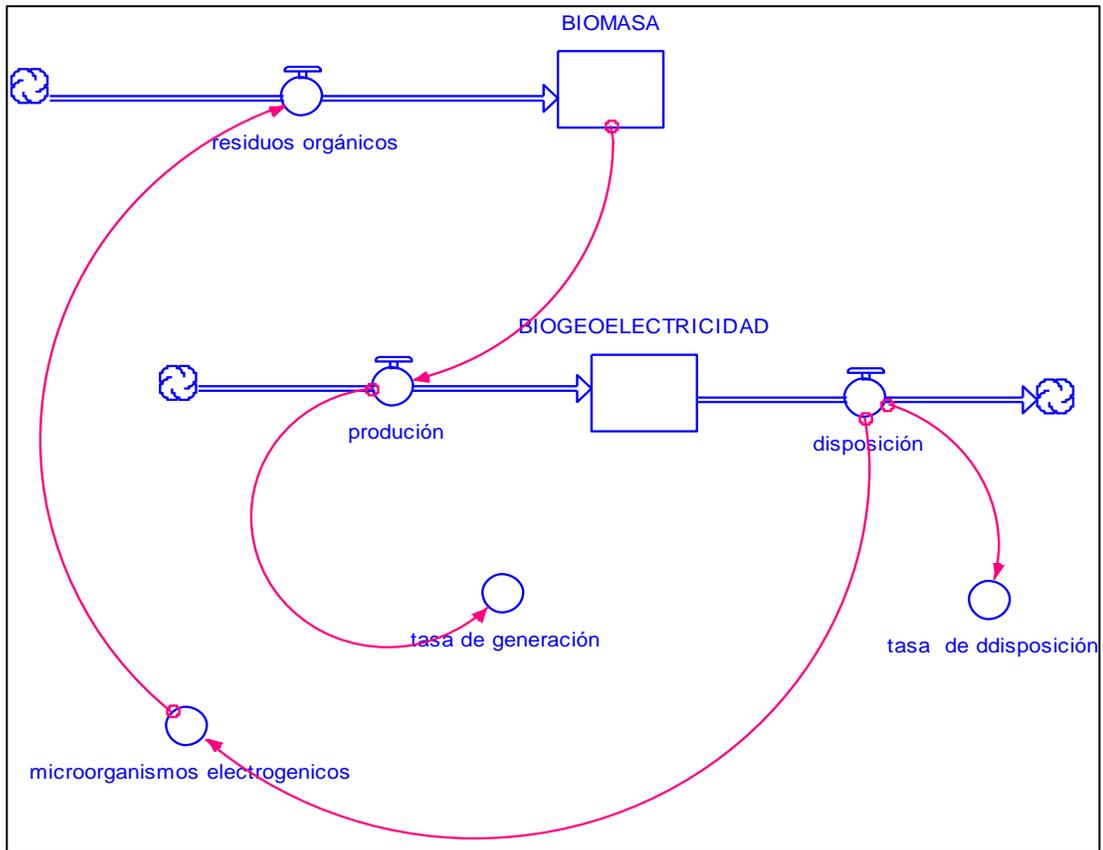


Figura 17. Diagrama sobre influencia de las estrategias de gestión en la disminución de vertidos y contaminación Sfwre Stella.

Fuente: el autor.

5.1.1 Actividad bioeléctrica de sustratos

Siguiendo el principio de operación de las baterías de tierra, se tomaron señales eléctricas naturales para identificar el fenómeno biogeoeléctrico en puntos al azar, utilizando electrodos de hierro y cobre incrustados sobre la superficie, en donde se registraron diferentes potenciales por punto de muestreo. Inicialmente se reportó un voltaje inicial de 198.2 mV sobre zona vegetada bajo sombra después de 20 minutos de estabilización como se evidencia en la figura 18a), del mismo modo en otro punto sobre zona vegetada, pero a sol directo reportó -0.010 mV como se muestra en la figura 18b, sin embargo en zona sedimentaria sin vegetación, con flujo de agua, se encontró un voltaje de 7.6 mV que se registra en la figura 18c, y por último, debajo de un tronco en descomposición se registró un voltaje de 35.2 mV (Figura 18d).

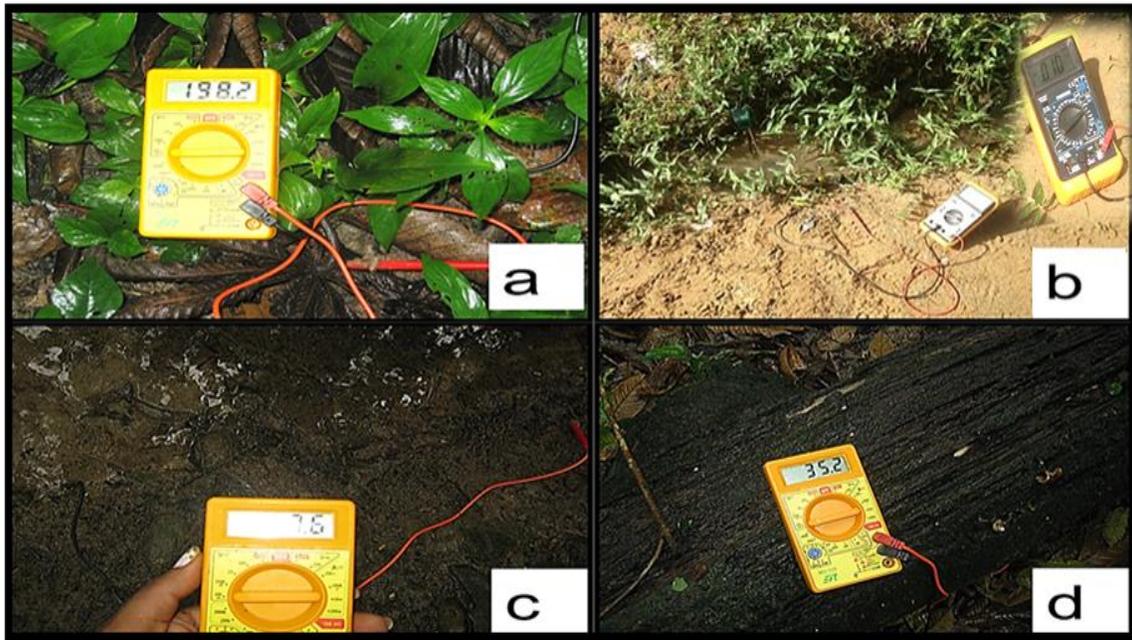


Figura 18. Exploración de autopotenciales. (a) Autopotencial en zona vegetada, (b) autopotencial en zona vegetada dentro del curso de la quebrada, (c) autopotencial en zona sedimentaria, (d) autopotencial debajo de un tronco en proceso de descomposición

Fuente: el autor.

Estos registros preliminares tan contrastantes podrían explicarse desde los fundamentos teóricos de los métodos eléctricos de prospección, en donde se conoce que las variaciones ambientales y el flujo de agua subterránea generan anomalías de potencial espontaneo de diversa magnitud (Auge, 2008). No obstante, desde la perspectiva del presente trabajo la ausencia de anomalías (≥ 100 mV)

o ausencia de electrones conductores se asumió como la incapacidad de la naturaleza para realizar degradación de contaminantes (Revil et al., 2010; Lopes, 2010).

En un nuevo rastreo en seis puntos al azar, se registraron autopotenciales que se presentan en la figura 19.

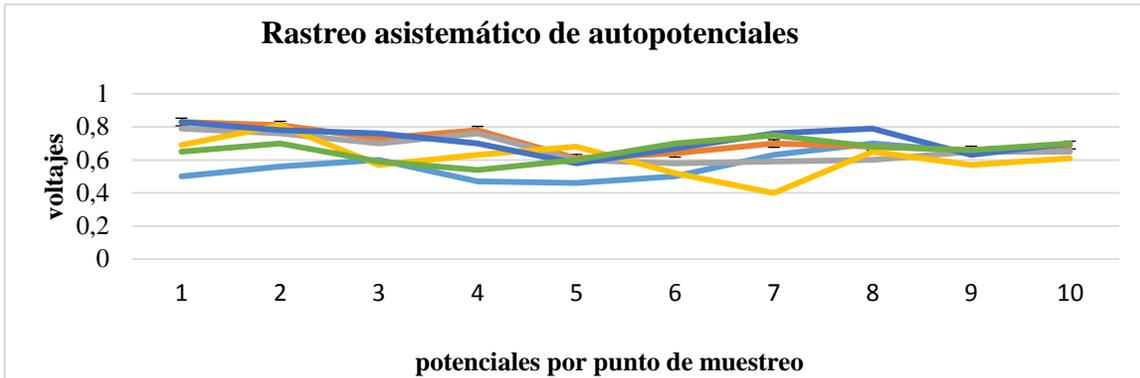


Figura 19. Rastreo asistemático de autopotenciales en seis puntos al azar

Para determinar el efecto del potencial sobre el factor punto de muestreo, se aplicó un análisis de varianza univariante de un factor (modelo de efectos fijos) que como su nombre lo indica se tiene un factor (punto de muestreo) y una variable dependiente (potencial).

Al aplicar el análisis de varianza debemos comprobar que se verifican los opuestos tales como: Homogeneidad de varianza, y normalidad. La tabla 10 según prueba de levene nos dice que como la probabilidad es mayor que 0,5, aceptamos la hipótesis nula de homogeneidad de varianza ($P_{valor} = 0,770443$; $F = 0,505977$). Por lo tanto se cumple este requisito necesario para dar validez a los resultados que se obtiene con el Anova.

Tabla 10 Prueba de Levene para Homogeneidad de Varianza

Levene's Test for Homogeneity of Variances (NIZA.sta)				
Effect: "Punto de Muestreo"				
Degrees of freedom for all F's: 5, 54				
	MS Effect	MS Error	F	p
Potencial	0,001012	0,002000	0,505977	0,770443

El supuesto de normalidad, se verifica si los residuos tienen una distribución normal. Observando la figura 20 (histograma) podemos afirmar que tanto la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors ($K-S_d = 0,07371$; $P_{valor} > 0,20$; Lilliefors $P_{valor} > 0,20$) como el de Shapiro-Wilk ($W = 0,98753$; $P_{valor} > 0,79905$), muestran valores de $P_{valor} > 0,20$ y, por tanto, se acepta la hipótesis nula de bondad de ajuste y los residuos se ajustan a una distribución normal.

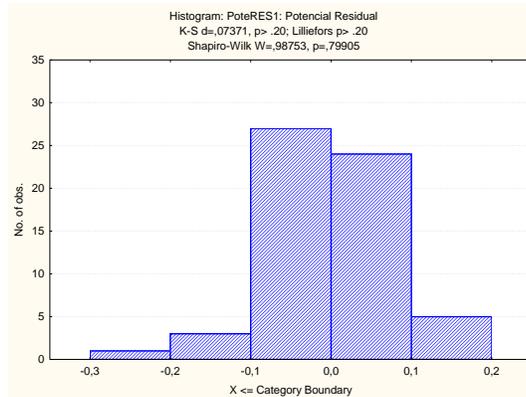


Figura 20 Histograma- Prueba de Normalidad

Fuente: el autor.

El Anova, cuyos resultados se muestran en la tabla 11, nos indica que hay diferencia significativa entre los potenciales de cada punto de muestreo ($F = 5,620$; $P_{valor} = 0,000306$), ósea que el potencial medido varía según el punto de muestreo.

Tabla 11 Resultados de Analisis de Varianza Univariado

Effect	Univariate Results for Each DV (NIZA.sta)				
	Degr. of Freedom	Potencial SS	Potencial MS	Potencial F	Potencial p
Intercept	1	25,71531	25,71531	3777,548	0,000000
Punto de Muestreo	5	0,19129	0,03826	5,620	0,000306
Error	54	0,36760	0,00681		
Total	59	0,55889			

Ahora podemos revisar entre qué niveles del factor punto de muestreo hay diferencias y entre cuales no, en este caso usamos la prueba de Tukey-HSD. Según tabla 12 (Tukey-HSD; variable potencial) se observa que hay diferencia entre los puntos de muestreo 1 y 2 ($P_{\text{valor}} = 0.001339$); entre el punto 1 y el punto 3 ($P_{\text{valor}} = 0,043750$) y entre los puntos 1 y 5 ($P_{\text{valor}} = 0.000779$), mientras que no existen diferencias significativas entre las medias del valor del potencial de los puntos 1 y 4, e igualmente entre el 1 y el 6.

Tabla 12 Prueba de Tukey HSD

Tukey HSD test; variable Potencial (NIZA.sta) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,00681, df = 54,000							
Cell No.	Punto de Muestreo	{1} ,55700	{2} ,71300	{3} ,66800	{4} ,61300	{5} ,72000	{6} ,65700
1	1		0,001339	0,043750	0,654666	0,000779	0,089838
2	2	0,001339		0,825478	0,089838	0,999967	0,654666
3	3	0,043750	0,825478		0,671664	0,721350	0,999695
4	4	0,654666	0,089838	0,671664		0,057325	0,838569
5	5	0,000779	0,999967	0,721350	0,057325		0,533114
6	6	0,089838	0,654666	0,999695	0,838569	0,533114	

Lo anterior puede ser verificado en la gráfica 21 (gráficos de medias e intervalos de confianza) y tabla 4 (estadística descriptiva), en el cuál se puede ver que la media de potencial más baja se logra en el punto 1 (0,557) y el más alto en el punto 5 (0,72000). Los intervalos correspondientes a los puntos 2 y 3 se solapan, es decir, no hay diferencia significativa en cuanto al promedio de potencial en tales puntos de muestreo.

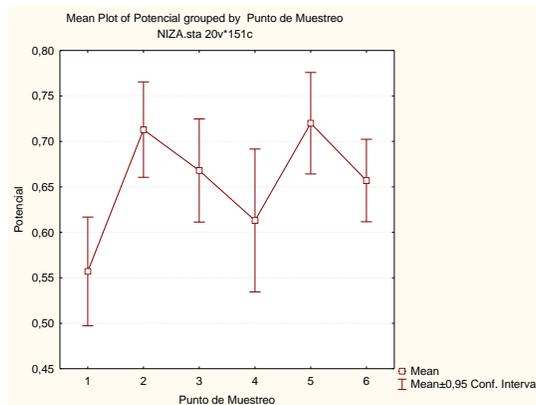


Figura 21 Histograma- Prueba de Normalidad

Vale la pena referir que los entornos en donde fueron registrados los autopotenciales son sistemas abiertos que interactúan con su cuenca de drenaje y la atmosfera, Lo que influye en las variaciones de potencial. Se conoce que existe un conjunto de potenciales espontáneos, cuyo origen esta asociado a diferentes fenómenos como por ejemplo a las variaciones de las propiedades del terreno (cambios de humedad, de su química, entre otros.), la presencia de cuerpos metálicos y actividad biológica de la materia orgánica, por lo tanto, son muchos los factores que influyen en la generación de autopotenciales, sobre todo si se acepta como cierto que el potencial aumenta a medida que la materia orgánica se degrada (Buitrón y Pérez, 2011).

Los sustratos ofrecen autopotenciales muy diversos según su naturaleza; fue por esto que, considerando la composición de los sedimentos como un aspecto importante para su identificación y reconocimiento, se tomó como referencia general la composición química de los suelos de Quibdó de acuerdo con el plan de ordenamiento territorial como se presenta en la Tabla 13.

Dicha información resulta relvante puesto que ofrece una idea general de la composición básica del suelo, lo que análogamente, para los fines de la presente investigación, podría catalogarse como un electrolito desde el enfoque de las baterías de tierra.

Por otra parte, el comportamiento del pH en función del potencial E, en voltios para cualquier tipo de suelo, puede determinarse fácilmente a partir de la ecuación de Nernst, de la siguiente forma:

$$E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log Q$$

En donde:

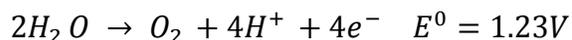
E= Potencial de la celda (suelo) en V

$E^0 = E^0$ cátodo - E^0 ánodo

n = Numero de electrones transferidos

Q= Ley de acción de masas

Para el tipo de suelo que se utiliza, se tiene:



De acuerdo a la ecuación de Nernst se tiene: $E = E^0 - \frac{0.0591}{n} \log Q$

$$n = 4 \quad Q = [H^+]^4$$

$$E = 1.23V - \frac{0.0591}{n} \log [H^+]^4$$

$$E = 1.23V - \frac{0.0591}{4} \log [H^+]^4$$

$$E = 1.23V - 0.0591 \log [H^+]$$

Pero : $PH = -\log [H^+]$

Por lo tanto : $E = 1.23V + 0.0591 PH$

Tabla 13 Composición química de los suelos de Quibdó

Nº. perfil conjunto	Profun Cm	pH 1:1	Complejo de cambio meq/100 g							P2O5 Kg/Ha
			CIC	CICE	BT	Ca	Mg	K	Na	
QUIBDÓ	0-12	5.0	7.1	2.3	0.9	0.2	0.2	0.3	0.2	21
	12-47	4.9	5.9	2.1	0.9	0.4	0.4	0.04	0.04	11
	47-78	5.0	8.5	2.6	0.5	0.2	0.2	0.04	0.04	14
	78-130	4.9	9.2	3.5	0.9	0.4	0.4	0.04	0.1	9

Fuente: el autor. Con base en la Alcaldía de Quibdó (2016) Nota: CIC (capacidad de intercambio catiónico), CICE (capacidad de intercambio catiónico efectivo), BT (acumulación de arcilla iluvial), Ca (calcio), Mg (magnesio), K (potasio), Na (sodio), P2O5 (óxido fosfórico), pH (potencial de hidrogeno)

Como estrategia complementaria se procedió a establecer una clasificación de los sedimentos recolectados de zonas aluviales, con relación al color, lo anterior, teniendo en cuenta que existe una relación entre esta característica y la mineralogía del sustrato, lo cual permite aproximarse a su composición. En edafología, este método constituye una forma sencilla, práctica y rápida para el análisis de suelos en campo (Domínguez, Román, Prieto y Acevedo, 2012). Los sedimentos recolectados fueron secados al aire libre para ser clasificados según el método Munsell como se muestra en la figura 22.



Figura 22. Clasificación de sedimentos de acuerdo con el color según tabla Munsell

Fuente: el autor.

Cuando los colores obtenidos en la clasificación van de amarillo pálido a rojizo indican pobreza de cargas de Fe y Mn, que puede estar generada por causas naturales o pedogenéticas (Domínguez,

Román, Prieto, y Acevedo, 2011). Según las ideas de Usón, Boixadera, Martín y Bosch (2010), estas causas pueden ser: “Lixiviación, procesos redox, acumulación de sustancias orgánicas, efecto de algunas especies vegetales”.

Del mismo modo se registraron autopotenciales en los sedimentos secos con electrodos inertes de grafito, los cuales indicaron que los sustratos presentan un comportamiento eléctrico diferente en relación con su color como se observa en la figura 23.

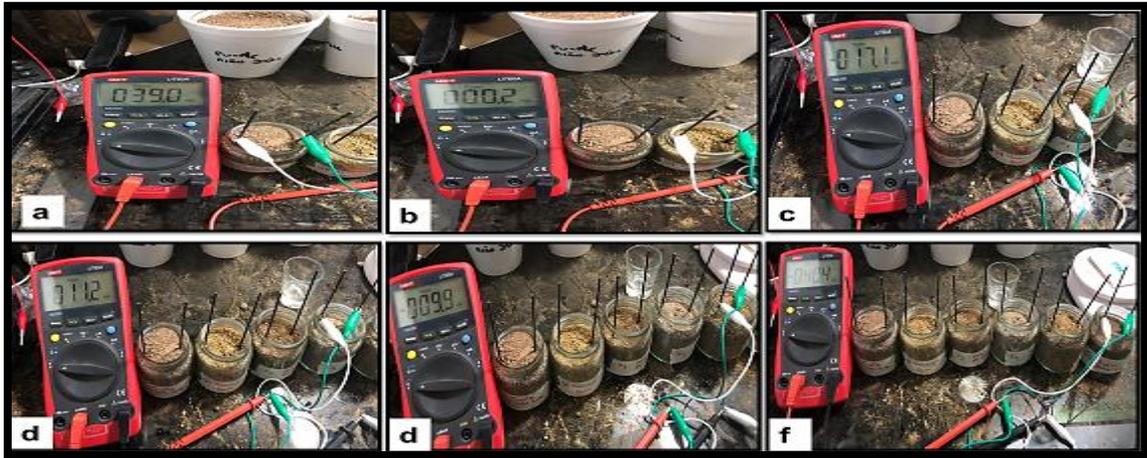


Figura 23. Medición de autopotenciales en sedimentos clasificados por color

Fuente: el autor.

Como se puede evidenciar en figura 24, cada uno de los sustratos registró un potencial diferente. De alguna manera, la determinación de potenciales con relación al color del suelo puede constituir un indicador práctico y rápido para establecer patrones eléctricos en un sustrato.

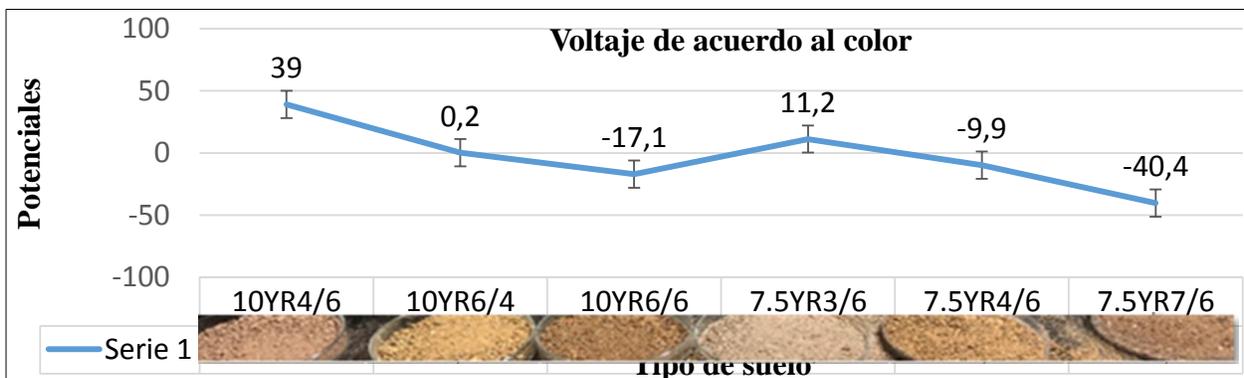


Figura 24. Voltaje de acuerdo al color

Fuente: el autor.

Es de resaltar que al utilizar electrodos inertes de grafito los valores de potencial al arrancar son bajos, estos tienden a subir a medida que la celda se estabiliza en un tiempo aproximado de 30 minutos. Song, Yan, Zhao y Jiang (2011) indicaron en su estudio sobre la construcción y operación de una celda de combustible sedimentaria que al arrancar el sistema se registra un bajo potencial, lo cual se debe a que es necesario que los microorganismos colonicen el electrodo formando una biopelícula. Con electrodos polarizables el potencial es más alto al arrancar en comparación con electrodos de grafito; sin embargo, el potencial disminuye en el tiempo debido a la oxidación y reducción de los electrodos. “Normalmente una celda de combustible microbiana en experimentación requiere entre 4 y 8 semanas para llegar a su máximo nivel” (Mocali, Fani, y Graziani, 2013, p. 42), aunque esto depende del tipo de suelo, las condiciones climáticas y el contenido orgánico.

Los resultados anteriores se realacionan de alguna manera con lo que se pudo evidenciar en el rastreo de potenciales en campo en donde el sedimento 2 y 6 registraron los potenciales más altos y el 1 y 5 los más bajos, encontradose alguna relación con la composición del sedimento y el contenido de humedad principalmente. El sedimento 5 presenta el error muestral más alto de 0,34 lo cual indica discrepancias o posibles errores en la toma del registro como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. *Estadística descriptiva rastreo asistemático de autopotenciales en seis puntos al azar*

Estadística descriptiva (Descriptive Statistics)							
	N Estad.	Mínimos Estadística	Maximos Estadística	media Estadística	Estad. Error	Estad. Deviacion	diferencia Estadística
sedimento1	10	0,46	0,70	,5730	,02745	,08680	,008
sedimento2	10	0,61	0,83	,7130	,02319	,07334	,005
sedimento4	10	0,58	0,79	,6680	,02507	,07927	,006
sedimento5	10	0,40	0,81	,6130	,03474	,10985	,012
sedimento6	10	0,58	0,83	,7200	,02468	,07803	,006
sedimento7	10	0,54	0,75	,6570	,02006	,06343	,004

Fuente: el autor.

De acuerdo a los propósitos de la investigación, estos autopotenciales identificados corroboran la existencia de actividad eléctrica de manera natural, lo cual representa una propiedad que cambia la manera de comprender el ecosistema. Aunque estos datos no representan el potencial eléctrico

total de la zona, esto se relaciona con lo planteado por Sill (1983) y Minsley, Sogade y Morgan (2007), quienes manifestaron que la existencia de potenciales espontáneos representa un recurso eléctrico en el suelo.

Es de recordar que algunos dispositivos como las baterías de suelo (*earth battery*) aprovechan esta tipo de energía de baja densidad en forma de corriente continua, en donde análogamente podría considerarse el suelo como un electrolito y condensador a la vez. A partir de esta experiencia se podría hipotetizar de igual manera que dichos constituyen indicadores de actividad e inactividad biodegradativa, teniendo en cuenta lo planteado por Buitrón y Pérez (2011).

5.1.1.1 Baterías de tierra

Tal y como se ha venido defendiendo en las experiencias anteriores, estas diferencias de potencial se pueden explicar por medio de lo planteado por Abdel-Mohsen y Evan (2018), quienes afirmaron que la corriente eléctrica en los suelos depende del contenido de humedad y la cantidad de sales disueltas en el fluido de poro. Aunque se requerirían otro tipo de análisis como el de absorción atómica para confirmar que el alto valor del potencial registrado en el sustrato procedente de mina, está influenciado por drenajes ácidos que contienen por lo general una gran cantidad de sólidos en suspensión, con un alto contenido de sulfatos y metales como lo afirma Aduvire, (2006, p. 1), se puede decir que esta información alcanza a dar una idea general del poqué se registro tan alto potencial en la pila que se muestra en la Figura 25 c.



Figura 25. Potencial sustrato pantanoso (0.64 v). (b) potencial sustrato orgánico tipo compost (0.35 v). Potencial e sustrato limoso/ arenoso proveniente de mina a cielo abierto (1.5 v)

Todas las pilas sedimentarias fueron construidas teniendo en cuenta el principio de operación de las baterías de tierra., considerando que : “La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre” (Abdel-Mohsen y Evan, 2018, p. 509), estando determinada por

“(a) sales solubles, (b) composición propia del terreno, (c) estratigrafía, (d) granulometría, (e) estado higrométrico, (f) temperatura y (g) compactación” (Ruelas, s.f., párr. 4).

Sin embargo, el aspecto relacionado con la influencia de la materia orgánica en los procesos bioelectrogénicos, debe ser revisado, dada su fundamental participación como combustible en la generación de electricidad por parte de la gran diversidad de microorganismos capaces de degradar contaminantes de distinta índole.

5.1.2 Influencia de la materia orgánica (MO) en la generación de bioelectricidad a partir de sedimentos

Siendo la materia orgánica uno de los constituyentes más importantes del suelo, se determinó el contenido de la misma mediante la realización de test de campo para MO por diferencias de pesos y por oxidación con peróxido de hidrógeno. Cabe resaltar que los suelos con materia orgánica suelen presentar una coloración oscura en su parte superficial, debido a la presencia de componentes húmicos, lo que de acuerdo con la tabla Munsell se encuentra denominado bajo la notación 10YR2/1 color negro. En ese orden de ideas y con el propósito de establecer algún indicador de biogeoelectrónico en función de la materia orgánica, se midieron autopotenciales en un sedimento teniendo en cuenta la presencia o ausencia de MO (ver Figura 26).

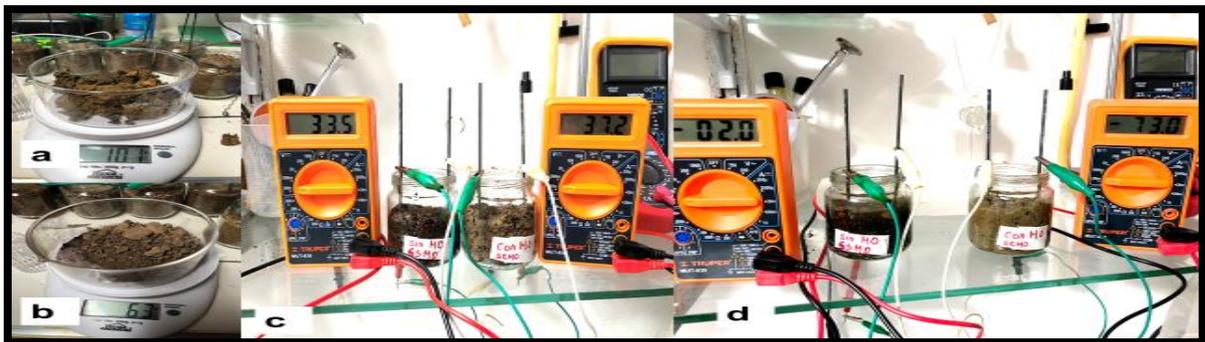


Figura 26. Comportamiento bioeléctrico de los sustratos con y sin materia orgánica durante 72 horas

Fuente: el autor.

Se determinó por diferencias de peso (material seco 101gr (figura 26a), versus material calcinado 63gr (figura 26b) que al iniciar el experimento se tenían 38 gr de materia orgánica. Desde el campo

de la agroecología es utilizado como metodo de campo para la determinación visual de materia orgánica, la efervescencia que provoca el contacto de esta con peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), lo cual se le conoce de manera popular como determinación de biomasa, siendo una adaptación del método de oxidación. Burés (2004) explica que el método de oxidación por peróxido de hidrogeno se recomienda en casos donde se requiere analizar a nivel de textura los suelos y la materia organica necesita eliminarse por su alto contenido. También sirve para establecer el contenido de materia orgánica en un suelo de bajo contenido de MO (Pérez, 2016).

Para el registro de potenciales se empleó el modelo propio de autopotenciales, en donde se monitoreó el comportamiento eléctrico de los sustratos con y sin MO en el tiempo. El potencial inicial del material sin calcinar (con MO) fue de 37.2 mV, frente al material calcinado que registró 33.5 mV (sin MO) (ver Figura 26 c). Al cabo de 15 días se evidenció la polarización invertida y una tendencia del material ccalcinado a bajar el potencial -2.0 mV y el material sin calcinar a subir -73.0 mV (ver Figura 26d). Cada prueba a la que se sometió el sedimento arrojó resultados variables, debido a la cantidad de factores que influyen en las reacciones que ocurren de manera simultánea al interior del sustrato, tanto a nivel biológico como geoquímico. Empero, se determinó que existe una correlación directa entre las muestra con y sin materia orgánica, se evidenció una correlación directa entre los voltajes de la muestra sin materia orgánica con relación a la muestra con materia orgánica como se ve en la Tabla 15.

Del mismo modo, se puede evidenciar en esta misma Tabla 15, cómo la diferencia entre las medias es de 42,35333 y que el límite aceptable está comprendido entre los valores 86,91914 y 2,21248. Como se observa, la diferencia se encuentra dentro de ese intervalo, por tanto se asume que las medias son diferentes. También se puede ver el estadístico t que tiene un valor de -1,944 y junto a su significación o valor p que vale ,062. Puesto que este valor es menor que 0,025 ($0,05 / 2 = 0,025$ dado que el contraste es bilateral), se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias.

Tabla 15. *Correlaciones voltajes en presencia y ausencia de materia orgánica*

		Correlaciones	
		Sin MO	Con MO
Sin MO	Pearson Correlación	1	,112
	Sig. (2-tailed)		,557
	N	30	30
Con MO	Pearson Correlation	,112	1
	Sig. (2-tailed)	,557	

Fuente: el autor.

5.1.3 Influencia del agua en la en la generación de bioelectricidad a partir de sedimentos

En la colecta de autopotenciales en la columna microbiológica por un ingreso no intencional de agua se pudo corroborar que el agua genera influencia en la generación de potenciales. La columna había alcanzado estabilidad en el potencial pero fue reactiva ante la presencia del líquido debido a la generación de hidrogeno, quedando registrado en las condiciones que se describen, una caída de potencial como se expone en Figura 27. [De otra parte] ejemplos de calibraciones entre la resistividad eléctrica y el contenido volumétrico de agua (McCarter, 1984; Fukue y otros, 1999; Michot y otros, 2000; Sreedeeep et al., 2004) muestran que la resistividad eléctrica disminuye cuando el agua el contenido aumenta. El contenido de humedad <15% permite que la resistividad eléctrica disminuya rápidamente al aumentar el contenido de agua (Abdel-Mohsen y Evan, 2018, p. 509)

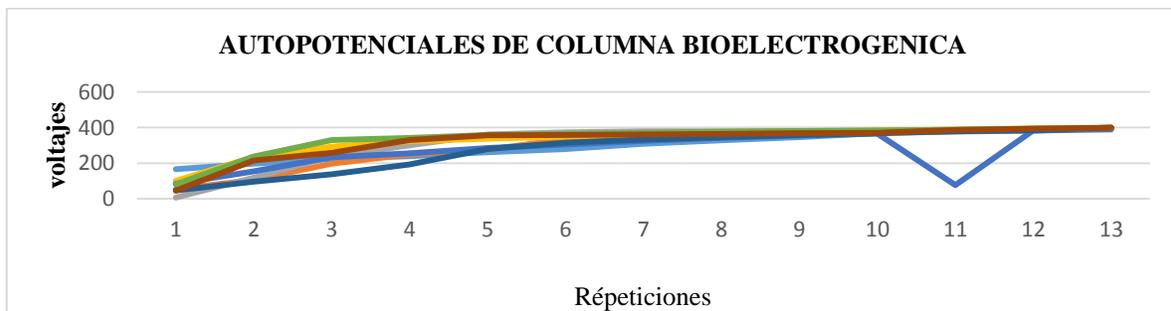


Figura 27. Autopotenciales de la columnan bioelectrogénica y demostración de la caída de potencial al ingreso no intencional de agua en la prueba 5 arrojando un voltaje de 76.2 mV

A partir de otra experiencia también se logró evidenciar que las muestras secas de sedimentos reportaron diferentes valores de voltaje que los húmedos (ver Figura 28).

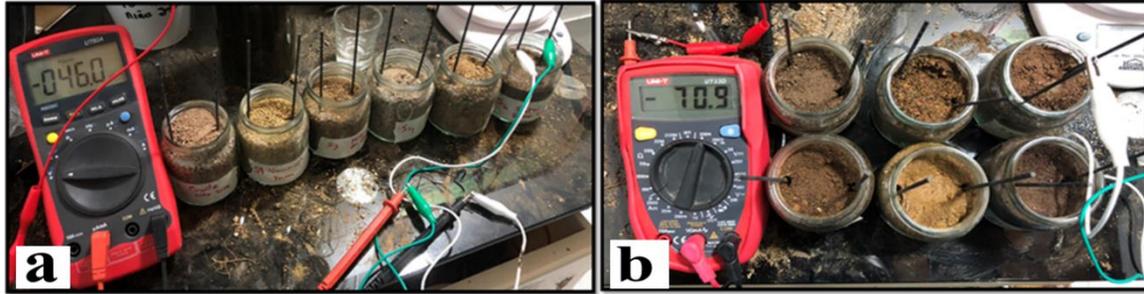


Figura 28. Autopotenciales en los sedimentos en condiciones de humedad y secos

Fuente: el autor.

Tabla 16. Voltaje muestras secas/muestras húmedas

	voltaje muestras secas/muestras húmedas					
Voltajes muestras secas	39	-2.4	-17.1	-24.7	-7.6	-46
Voltajes muestras húmedas	22.8	4.9	7.4	8.3	26.4	70.8

Fuente: el autor.

En la tabla 18 se presenta una desviación estándar de 28.38 con relación a la media entre las muestras secas, lo cual puede deberse a la gran variabilidad de potenciales registrados en los sedimentos. De igual manera en las muestras húmedas tampoco se evidencia una tendencia o patrón uniforme en el comportamiento del voltaje, sin embargo, la desviación estándar es inferior con relación a la de las muestras secas. A lo anterior se agrega el hecho de la polarización de potenciales lo que da lugar a interpretaciones más complejas dentro del contexto biogeoelectrico

Tabla 17. Estadística descriptiva Voltaje muestras secas/muestras húmedas

(Estadística descriptiva) <i>Descriptive Statistics</i>					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Voltaje muestras secas	6	-46	39	-9.8	28.38
Voltajes muestras húmedas	6	7.40	70,80	29.1167	23.61
Valid N (listwise)	6				

Fuente: el autor

5.2 Biogeobateria con dispositivo Mudwatt como Modelo para el Estudio de Fenómenos Biogeoeléctricos

Como ya se ha mencionado, el modelo de referencia que se utilizó fue el de tanques para la generación de señales (SP), a partir de biogeobatería no lineal concebido experimentalmente como (aBES) según Fachin et al. (2012). Se utilizó el sedimento clasificado como 10YR4/6 según la tabla Munsell en el montaje de un dispositivo conocido comercialmente como MudWatt que funciona como un biorreactor para la producción de bioelectricidad con lodos, lo que permitió cuantificar y analizar la actividad de las bacterias en vivo a través del software explorador de MudWatt en su versión 1.4 para IOS como se muestra en la figura 29.

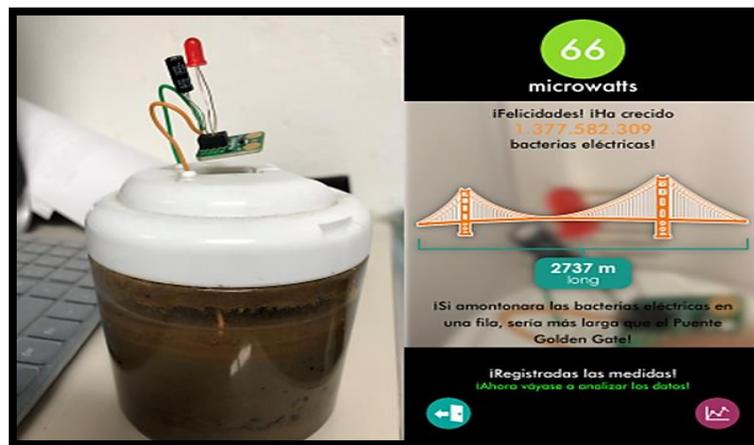


Figura 29. Dispositivo MudWatt utilizado para cuantificar la bioelectricidad y analizar la actividad bacteriana

Fuente: Keego Technologies LLC

El biorreactor MudWatt fue cargado con sedimentos 10YR4/6 según la clasificación de color; en la primera medida arrojó un potencial de arranque de 32.7 mV como se ve en la figura 30a utilizando electrodos inertes de grafito, después de transcurrido 60 minutos alcanzó un voltaje de 302 mili voltios como se observa en la Figura 30b), no obstante, con los electrodos circulares de grafito de mayor área superficial el voltaje de arranque fue de 16.1 mili voltios; cabe anotar que en este registro el sistema se encontraba en condiciones anaerobias (con tapa) a diferencia del caso inicial en donde ambos electrodos estaban en contacto con el aire. En un mes la celda en condiciones anaerobias había alcanzado un voltaje de 812 milivoltios, con los cuales se realizó el montaje del circuito para el estudio de la dinámica bioeléctrica a través del software de monitoreo.



Figura 30. Condiciones iniciales biorreactor Mudwatt. (a) Voltaje de arranque con electrodos de grafito, (b) voltaje 60 minutos después con electrodos de grafito (c) voltaje de arranque con el electrodo de grafito en forma de disco y (d) voltaje

Fuente: el autor.

En esta prueba se pudo observar que los valores de potenciales tienden a aumentar en el tiempo, sin embargo, tal como se ha manifestado se presentan eventos de disminución de voltaje que podrían tener su explicación en lo relacionado con el equilibrio del sistema mientras las bacterias logran acoplarse en él, sumado a la influencia de las condiciones ambientales.

Con un voltaje máximo de 812 mV en la celda construida se inició el monitoreo del comportamiento bioeléctrico de sedimentos de acuerdo con los datos obtenidos con la celda MudWatt, la cual permite convertir el número de intermitencias de luz en corriente producida (en micro Watts (μW), además el software ofrece una hoja de cálculo (ver Anexo 3) para la población de microbios y energía, en la cual se puede estimar la cantidad de microbios donantes de electrones alrededor del ánodo de MudWatt. Esto de algún modo concuerda con lo planteado por Bullen y Arnot (2006), quienes afirmaron que ante una diferencia de potencial mayor, será mayor también la ganancia energética en la bacteria y por consiguiente, aumentará la reproducción, lo cual es favorable para la eliminación de materia orgánica.

Lo anterior es coherente sobre todo si se tiene en cuenta que las bacterias electrogénicas pueden tener diferentes tipos de respuestas a diferentes choques. Por ejemplo, cambio agudo de potencial para los compuestos tóxicos agudos, mientras que la tensión lenta cambia para los contaminantes crónicos como lo reporta Kim et al. (2007) como se citó en Buenaño y Cruz (2016).

Con referencia a los valores de voltaje registrados, también se puede decir que estos autopotenciales significativos (mayor a 100 mV) como lo sugiere Revil *et al.* (2010), se convierten en un indicador de la presencia de microorganismos capaces de generar bioelectricidad, lo que a su vez se traduce en actividad biorremediativa equivalente a la degradación de materia orgánica. Con esta estrategia se aporta en la conceptualización de lo que se ha denominado como bioelectroextracción, aludiendo a esta capacidad de generar electricidad por medios biológicos a partir de materia orgánica como mecanismo de Bioelectroremediación.

Así, por medio del método de autopotenciales se ha podido evidenciar que la actividad de electro generación bacteriana se puede registrar a partir del comportamiento eléctrico de un sustrato con relación al tiempo. Para calcular la potencia, el biorreactor MudWatt utiliza una aplicación que cuenta la cantidad de intermitencias de luz en un minuto del circuito instalado que usa un condensador ($10\mu\text{F}$) en modo Blinker, sistema que fue diseñado por *Science Buddies* para caracterizar la relación entre el poder y la frecuencia de intermitencias de luz, teniendo en cuenta a El-Naggar *et al.* (2010) que estudió el transporte eléctrico a lo largo de nanohilos bacterianos de *Shewanella oneidensis* MR-1 y a McLean *et al.* (2010) que cuantificó las “tasas de transferencia de electrones a un aceptor de electrones en fase sólida a través de las etapas de formación de biofilm desde células individuales a comunidades multicelulares” (p. 2721). La potencia inicial de arranque del sistema se presenta en la Tabla 18 y la final en la Tabla 19.

Tabla 18. Potencia MudWatt (en microWatts) condiciones iniciales de arranque

2018-06-24 a las 15:27:28	Potencia MudWatt (en microWatts): 81
Corriente del Mudwatt (en Amperios)	2,70E-04
Corriente del Mudwatt (en electrones por segundo):	1,69E+15
Corriente promedio por microbio electrogénico activo (en electrones por segundo)	1,0E+06
Corriente promedio por microbio electrogénico activo (en Amperios)	1,6E-13
Cantidad de microbios electrogénicos activos en MudWatt:	1.685.207.633

Fuente: el autor.

Tabla 19. *Potencia MudWatt (en microWatts) condiciones finales.*

2018-07-08 a las 21:37:31	Potencia MudWatt (en microWatts): 58
Corriente de tu Mudwatt (en Amperios)	1,93E-04
Corriente de tu Mudwatt (en electrones por segundo)	1,21E+15
Corriente promedio por microbio electrogénico activo (en electrones por segundo)	1,0E+06
Corriente promedio por microbio electrogénico activo (en Amperios)	1,6E-13
Cantidad de microbios electrogénicos activos en MudWatt:	1.206.691.885

Fuente: el autor.

A los desarrolladores del dispositivo, el valor de la tensión revela la química en el sistema MudWatt, mientras que la corriente da indicios sobre salud de los microorganismos, en este sentido se observa que al disminuir la corriente disminuye simultáneamente la cantidad de microbios electrogénico que reporta el sistema. A continuación, en la figura presenta la curva de potencial que corresponde a la dinámica bioeléctrica del sedimento analizado (ver Figura 31) (Ver anexo 6)

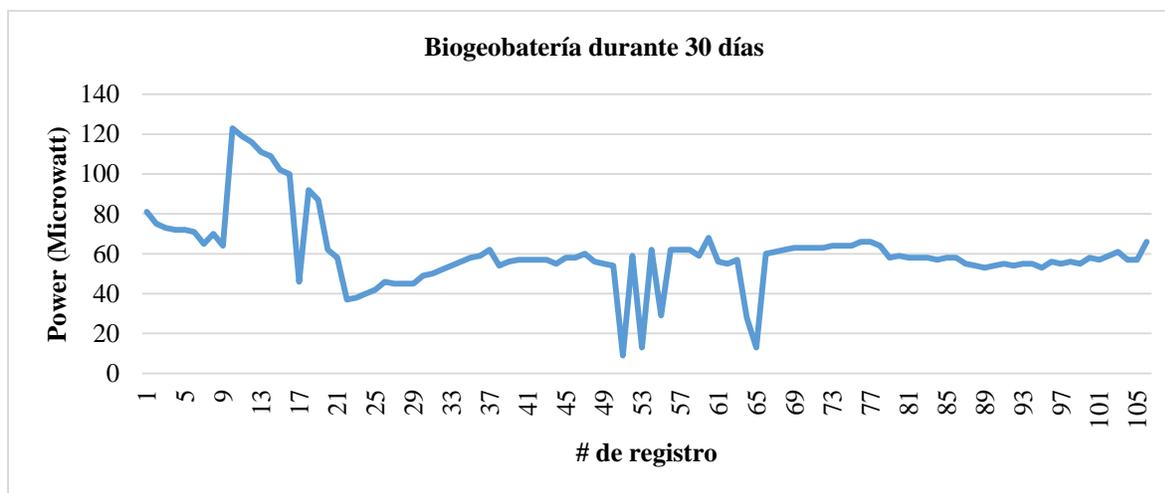


Figura 31. Dinámica eléctrica del sedimento 10YR4/6 autopotenciales durante 30 días.

Fuente: el autor.

Teniendo en cuenta la dinámica que refleja la gráfica del comportamiento bioeléctrico del sedimento, se puede observar fácilmente que los valores más altos de potencia se obtuvieron al inicio del monitoreo, pero dentro de los registros de potencial en el sistema se evidenciaron

alteraciones de potenciales causados posiblemente por cambios ambientales bruscos de temperatura con caídas de la potencia hasta llegar a 9 microWatts. Lo anterior se puede interpretar como un fenómeno con el que responden las bacterias al incremento de temperatura y da a entender cuáles son las condiciones ideales en las que puede operar un dispositivo configurado para la obtención de electricidad.

De igual forma, se registraron incrementos de potencia ocasionados al mover el Mudwatt, lo que podría estar relacionado con que la falta de oxígeno disminuye la potencia similar a lo reportado por He, Shao y Angenent (2007) en cuanto al hecho de que cuando se colocó un cátodo movable a 2 rpm se incrementó la densidad de potencia alcanzando valores de 49 mW/m², con respecto a las que estaban en condiciones anaerobias ofreciendo un potencial 29 mW/m². Aunque de acuerdo con el ideal de sostenibilidad, lo más conveniente sería incluir en el sistema mecanismos biológicos de oxigenación para evitar gastos externos de energía e incrementos de costos.

Otros de los aspectos que llama la atención lo constituye la aparición de una línea anaranjada/rojiza perpendicular al ánodo en contacto con el oxígeno, lo cual se asume como la colonización de microbios foto-heterótrofos según la teoría de las columnas de Winogradsky que son construidas aprovechando el metabolismo de los microorganismos. Este evento tiene relación con la investigación realizada por Figueredo, Olaya y Cortón (2014), en donde existen bacterias heterótrofas en el ánodo capaces de oxidar moléculas orgánicas en celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético.



Figura 32. Colonización por bacterias foto-heterótrofas

Resulta interesante ver como después de 8 meses de establecimiento, son notables los cambios en la dinámica ecológica del sustrato en el biorreactor. Tal como se muestra en la Figura 33, se presenta una manifestación de autoorganización y complejidad por parte de la comunidad de microorganismos que se estratifican de acuerdo a su metabolismo de manera autónoma. Esta condición concuerda con el fundamento del método de la columna de Winogradsky en donde después de haber agotado todos los nutrientes dentro del sistema colonizan bacterias fotoheterótrofas utilizando luz para su sostenimiento. Por otra parte y debido a que el potencial fue medido en intervalos irregulares de tiempo se optó por trazar una gráfica en el plano de potencial versus fecha de muestreo como se muestra en la Figura 34, en la cual se observa que el valor promedio de potencial más alto se logra el día 24 de junio del 2018, y el más bajo el 12 de junio del 2019; además, los valores de potencial tienden a decrecer significativamente a partir de la fecha de medición 20 de agosto del 2018 hasta el 12 de junio del 2019.

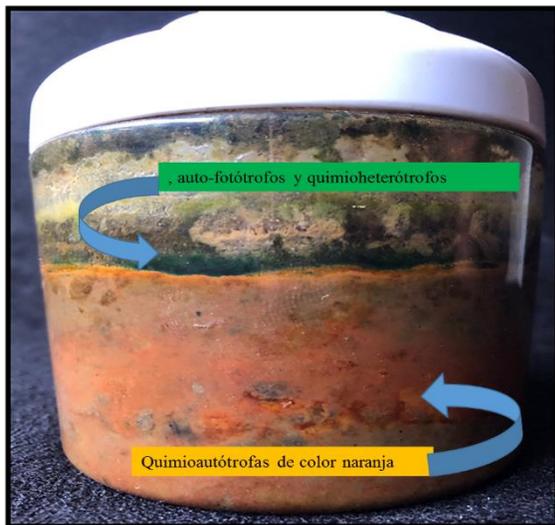


Figura 33. Evolución ecológica del sustrato en el biorreactor Mudwatt

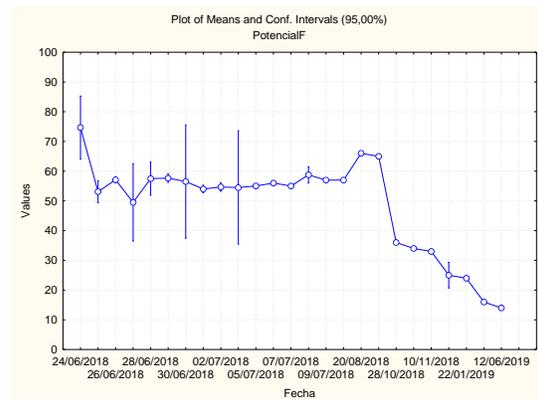


Figura 34. Evolución ecológica del sustrato en el biorreactor Mudwatt

5.3 Microbioma en sedimentos y su rol ambiental

Teniendo en cuenta que la bioelectricidad presente en los sedimentos se le atribuye en gran medida a los microorganismos presentes en él, se construyeron columnas de Winogradsky, como las mostradas en la figura 35 como método práctico para identificar presencia o ausencia de actividad biológica en el sedimento, y así obtener un perfil general de la microbiología de los sedimentos con base en la estratificación de estos de acuerdo con su metabolismo.



Figura 35. Columnas de Winogradsky con sedimentos de zonas aluviales en diferentes sectores de la quebrada la Yesca –Quibdó incubados en Columnas de Winogradsky

Fuente: el autor

Este modelo de microcosmos preparado con sedimentos de zonas aluviales influenciadas con aguas residuales incubadas bajo efecto de la luz del sol directa es un ejemplo claro de las diferentes expresiones metabólicas de las bacterias. En la Figura 35 se presentan seis columnas construidas con diferentes sedimentos sin adición de nutrientes y fueron dejadas en condiciones anóxicas, obteniendo como resultado que los microorganismos se organizaron según sus necesidades, y es por esta razón que su comportamiento en estos sistemas representativos que simulan un microcosmos pueden ser un indicador de la dinámica del sedimento, la composición orgánica e inorgánica, estructura y función, lo cual concuerda con el trabajo denominado distribución temporal y espacial de la comunidades microbianas de la columna de Winogradsky realizado por Esteban et al. (2015).

Dependiendo del origen de las muestras de suelo y del contenido de nutrientes aparecen manchas de diferentes colores, esto tiene que ver con las condiciones ambientales al interior de la columna, en cuanto a la presencia de oxígeno y de azufre, lo que hace posible reconocer comunidades bacterianas.



Figura 36. A la izquierda columna al inicio de la incubación, a la derecha columnas 30 días después de la incubación

Fuente: el autor.

Por otro lado, en un experimento similar se adicionó en la columna, papel como fuente de carbono, cáscaras de huevo trituradas como fuente de carbonato de calcio y yema de huevo como fuente de azufre (Burgos, 2012). De acuerdo con Moreno et al. (2012) como se citó en Gonzales et al. (s.f.), la identificación de potenciales microorganismos con base en la coloración de los estratos puede ser como se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20. Potenciales microorganismos con base en la coloración de los estratos

COLOR	MICROORGANISMOS
Verde	Algas y Cianobacterias
Rojo/marrón	Cianobacterias o Tiobacilos
Rojo/Púrpura	Bacterias púrpuras no del azufre
Blanco	Bacterias sulfo-oxidadoras
Rojo/Púrpura	Bacterias púrpuras del azufre
Verde	Bacterias verdes del azufre
Negro	Bacterias sulfo-reductoras o fermentadoras

Fuente: el autor. Con base en Moreno et al. (2012) como se citó en Gonzales et al. (s.f.)

Tomando en cuenta lo anterior, se identificaron de manera general: auto-fotótrofos y quimioheterótrofos característicos por ubicarse en la parte superior de la columna y por presentar una coloración verde (ver Figura 37c), bacterias quimioautótrofas de color rojo/marrón (ver Figura 37a), de color naranja (ver Figura 37d y 37e), en donde se encuentran las bacterias que no dependen

del azufre, de color rojo/púrpura (ver Figura 37b) se encuentran bacterias fotoheterótrofa dependiente del azufre y en el fondo se encuentran bacterias anaerobias sulfo-reductoras o fermentadoras (ver Figura 37f). A este tipo de bacterias puede atribuirse el hecho de que esta columna presentó producción de gas, dando a entender además que los sedimentos contenían materia orgánica en proceso de biodegradación.



Figura 37. Microorganismos presentes en columnas identificados de acuerdo con su metabolismo. bacterias quimioautótrofas de color rojo/marrón(a), bacterias que no dependen del azufre, de color rojo/púrpura (b), auto-fotótrofos y quimioheterótrofos característicos.

Se realizaron otros experimentos para identificar potenciales espontáneos y de tal forma, introducir en el campo de la generación de electricidad por bacterias.

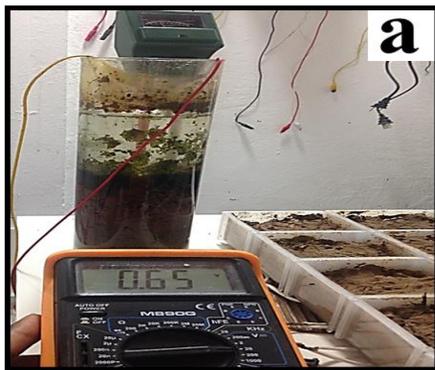


Figura 38. Comportamiento bioeléctrico de la columna de Winogradsky en un ciclo de un segundo. Es un método práctico para analizar un sustrato desde una perspectiva biogeoelectrónica en una columna que se constituye como una muestra del ecosistema de donde procede

Fuente: el autor

5.4 Sistemas Biogeoeléctricos Artesanales a Bajo Costo: con Sedimentos y con Plantas.

Retomando toda la experiencia presentada hasta el momento, la cual ha tenido la intención de utilizar todo el conocimiento en materia de fenómenos biogeoeléctricos como punto de partida para la apropiación, adopción y desarrollo de alternativas tendientes a revertir la percepción negativa de muchas zonas aluviales como a las que se hace referencia, se presenta a continuación el proceso de construcción de dos sistemas biogeoeléctricos artesanales como una alternativa de valor ambiental en doble vía que permite aprovechar un recurso energético libre derivado de la acción natural de bacterias que al degradar materia orgánica liberan electrones.

Tal como se ha venido exponiendo, el conocimiento de las señales de autopotencial ofrece una nueva forma de interpretación sustratos dentro y fuera del entorno correspondiente, como lo reveló la experiencia con los sedimentos aislados de las zonas aluviales con influencia de aguas residuales y otros experimentos que reportaron autopotenciales en los sustratos ambientales:



Figura 39. (a) Sedimento pesado (100gr), (b) medición de potenciales en seco (-0.049 v), (c) medición de potenciales hidratado (0.072v)

Fuente: el autor.

De igual manera, también ya se ha referido que potencial en un sustrato se ve influenciado por muchos factores y en este sentido se comprende la heterogeneidad de valores reportados, así como se presentó en el experimento en donde se analizó de manera generalizada la electricidad en sedimentos de acuerdo con el color, utilizando el Método Munsell.

5.4.1 Prototipo de biogeobatería sedimentaria

La biogeobatería con sedimentos 10YR4/6 reportó un potencial inicial de 10.97 voltios (ver Figura 40). Lo anterior resulta interesante desde el punto de vista práctico y como aporte en la construcción del paradigma bioelectrosistémico propuesto.

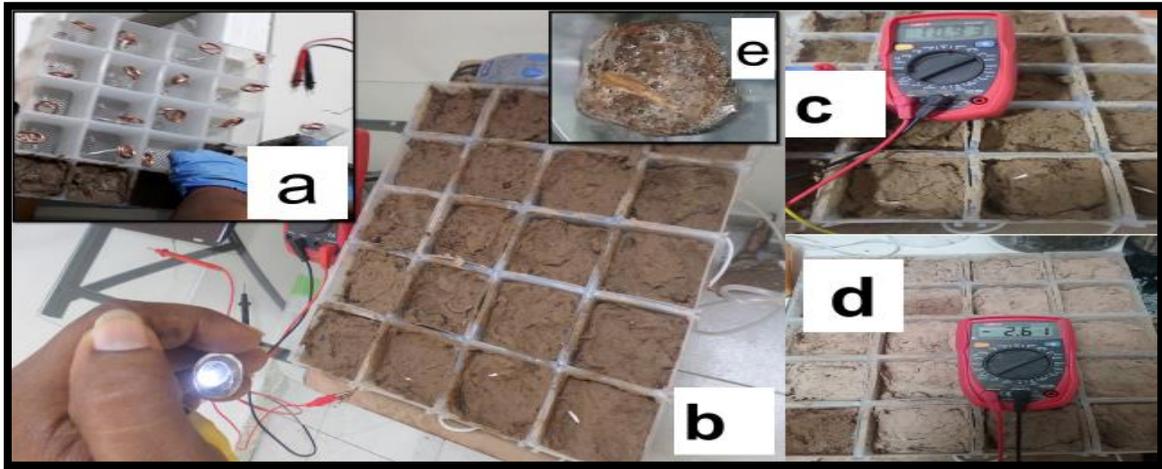


Figura 40. (a) Configuración en serie de electrodos de hierro y cobre, (b) biogeobatería con el led encendido, (c) voltaje inicial de la biogeobatería, (d) pérdida de humedad, cambio de color y disminución de voltaje de la biogeobatería, (e) determinación de presencia o ausencia de materia orgánica por oxidación con peróxido de hidrógeno

Fuente: el autor.

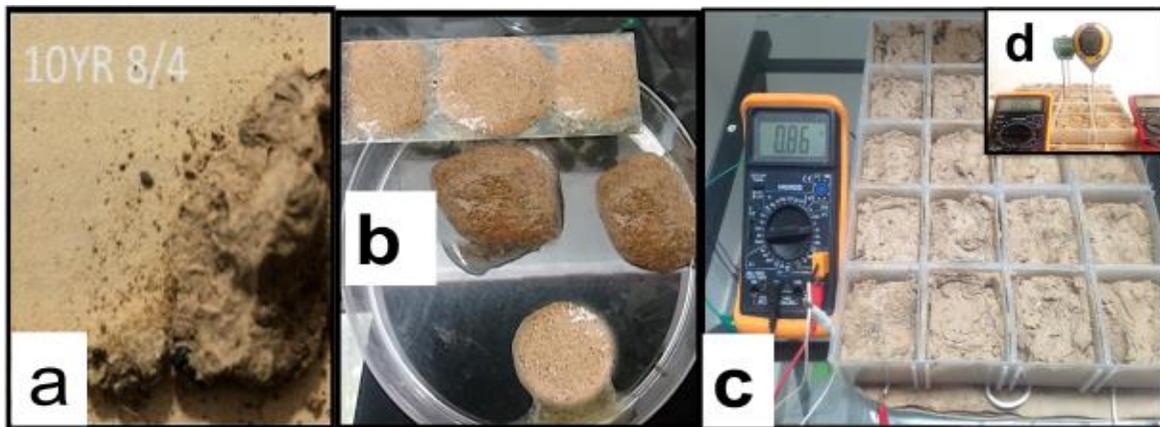


Figura 41. Clasificación por color sedimento biogeobatería totalmente seca, (b) determinación de presencia o ausencia de materia orgánica por oxidación con peróxido de hidrógeno, (c) voltaje obtenido con la biogeobatería seca y (d) potencial de 0.57v.

Fuente: el autor

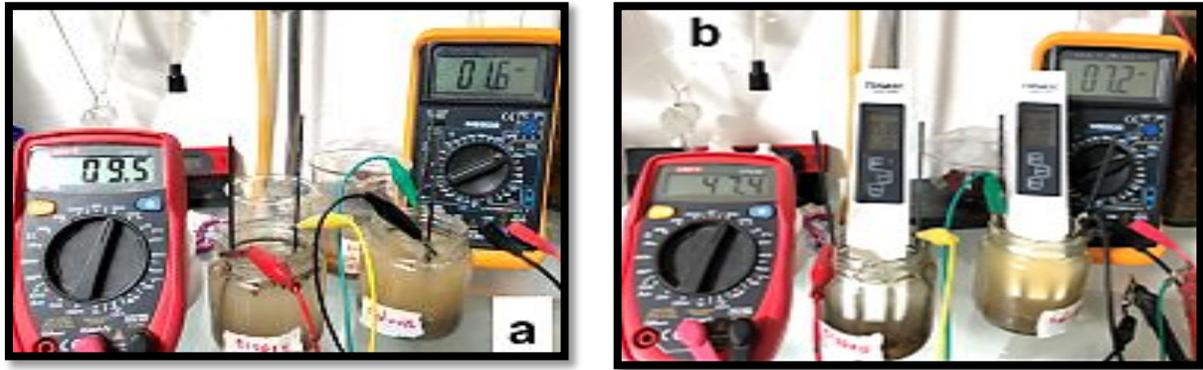


Figura 42. (a) Mediciones de voltaje en modelo propio para mediciones de autopotenciales, (b) mediciones de conductividad en sedimentos de biogeobatería con relación a un sedimento fresco

Fuente: el autor.

Tabla 21. Voltajes y conductividad del sedimento extraído de la biogeobatería seis meses después de su montaje con relación a un sedimento fresco durante 15 días

Días	Sedimento biogeobatería		Sedimento fresco (sin biogeobatería)	
	Voltaje mV	Conductividad EC	Voltaje mV	Conductividad EC
1	47.4	538	7.2	280
2	47.5	538	7.9	280
3	47.6	538	7.5	280
4	47.8	532	6.7	280
5	48.3	498	6.1	280
6	41.8	400	6.0	280
7	41.6	378	5.8	280
8	41.7	380	3.6	266
9	41.8	402	3.7	264
10	41.6	398	3.9	262
11	42.5	586	3.2	270
12	42.4	586	3.0	294
13	41.3	568	2.9	294
14	41.5	554	2.9	292
15	42.2	418	2.9	292

Fuente: el autor.

Con estos datos se realizaron las respectivas correlaciones de acuerdo con el voltaje y la conductividad.

El potencial máximo obtenido en la biogeobatería fue de 48,3 milivoltios, en contraste con el sedimento fresco con 7,9 milivoltio (Tabla 21). Estos datos guardan relación con la tesis que se propone con relación a la bioelectroextracción. Los datos reportados muestran que la conductividad máxima obtenida con el sedimento fresco fue de 294, con relación al sedimento de la biogeobatería que reportó un máximo de 586 (ver Tabla 21).

Tabla 22. Voltajes y conductividad del sedimento extraído de la biogeobatería versus sedimento fresco durante 15 días

Estadística descriptiva (Descriptive Statistics)					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Voltaje sedimento biogeobatería	15	41.3	48.3	43.8	2.9
Conductividad sedimento biogeobatería	15	378	586	487.6	80.8
Voltaje sedimento fresco	15	2.90	7.9	4.9	1.9
Conductividad sedimento fresco	15	262	294	279.6	10.5
Valid N (listwise)	15				

Fuente: el autor.

Al comparar el potencial de sedimento de la biogeobatería (seis meses) con un sedimento en fresco, se encuentran grandes diferencias. El sedimento de la biogeobatería reporta mayor voltaje y mayor conductividad que el sedimento en fresco. Se sabe que requiere de tiempo para que las bacterias colonicen el electrodo y liberen los electrones resultantes del proceso de biotransformación. En la Tabla 22 y 23 se presentan las correlaciones establecidas para el potencial y la conductividad entre el sedimento fresco y el de la biogeobatería.

Tabla 23. Correlación voltaje sedimento biogeobatería voltaje sedimento fresco

Correlations			
		Voltaje Sedimento biogeobatería	Voltaje sedimento fresco
Voltaje sedimento biogeobatería	Pearson Correlation	1	,816**
	Sig. (2-tailed)		,000
	N	15	15
Voltaje sedimento fresco	Pearson Correlation	,816**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	
	N	15	15

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Fuente: el autor.

Tabla 24. *Correlación conductividad sedimento biogeobatería conductividad sedimento fresco*

		<i>Correlations</i>	
		Conductividad Sedimento biogeobatería	Conductividad Sedimento fresco
Conductividad Sedimento biogeobatería	Pearson Correlation	1	,501
	Sig. (2-tailed)		,057
	N	15	15
Conductividad Sedimento fresco	Pearson Correlation	,501	1
	Sig. (2-tailed)	,057	
	N	15	15

Fuente: el autor.

5.4.2 Prototipo de biogeobatería con planta ornamental *Dieffenbachia* ssp

El prototipo de biogeobaterías con plantas fue construido en un área total de 70 cm², correspondientes a seis celdas conectadas en serie como se muestra en la figura 43c, utilizando sustrato comercial Hum Lombrisol, el cual fue seleccionado por tener una composición de carbono orgánico oxidable del 19,50 % y ser derivado de las lombrices. Como especie vegetal se utilizó la *Dieffenbachia* ssp, escogida por ser una planta de ornato apta para interiores y por su capacidad de subsistir bajo sombra, además de ser una especie fácil de encontrar localmente.

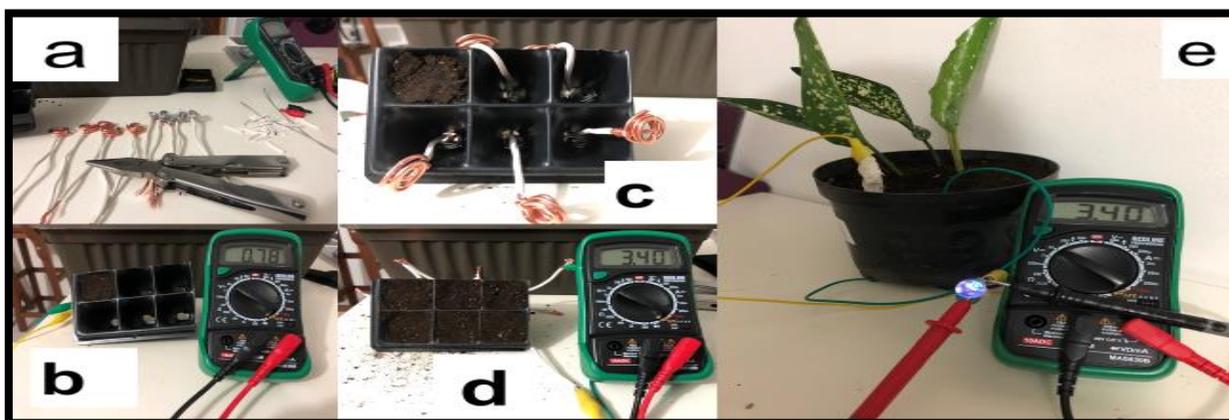


Figura 43. (a) Electrodo de hierro y cobre, (b) prueba de voltaje del sustrato en minicelda, (c) configuración de electrodos, (d) voltaje de las celdas conectadas en serie, (e) prototipo con la especie *Dieffenbachia* ssp.

Fuente: el autor.

De tal manera, la biogeobatería construida permitió encender con 3.4 V y 10 mA. Cuando el sustrato permanece húmedo sin saturarse es posible mantener encendido un led por aproximadamente un mes, es decir, aproximadamente 720 horas, siempre y cuando no se deterioren los electrodos si estos son polarizables. Cabe resaltar que cuando se utilizan este tipo de electrodos, se desgastan con el tiempo debido a que reaccionan fácilmente con el medio, oxidándose o reduciéndose. En el proceso de construcción se replicaron algunos de los principios de configuración utilizados en las baterías de suelo (*earth battery*) y de operación empleados en las celdas de combustible que aprovechan la fotosíntesis de las especies vegetales que se les conoce como (planta microbial fuel cell, PMFC. En estos prototipos, las plantas utilizan el principio de rizodeposición de compuestos orgánicos para la generación de la electricidad (Figueredo et al., 2014).

5.4.2.1 Medición de señales eléctricas en especies vegetales

Siguiendo la metodología propuesta por Gonzales et al. (2017), se eligió la planta *Vetiveria zizainoides* como exponente vegetal para estudiar fenómenos bioeléctricos espontáneos que representan la electricidad con base en la fotosíntesis; lo anterior considerando las inigualables facultades de la especie como fitorremediadora tanto de suelos como de aguas (Sepúlveda, 2013; Sepúlveda y Betancur, 2016). El rastreo bioeléctrico se realizó midiendo la diferencia de potencial en los siguientes experimentos: la especie a raíz desnuda sin sustrato mostrada en la figura 44 y la especie en sedimentos mostrada en la figura 45.

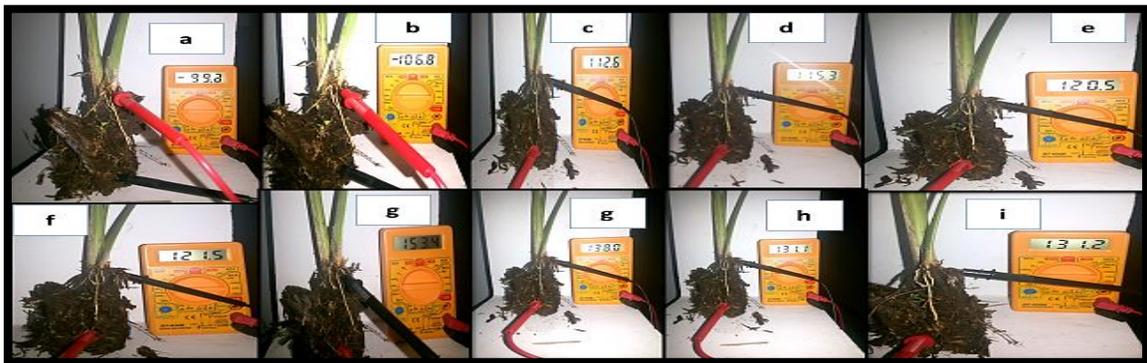


Figura 44. Rastreo bioeléctrico con la especie *Vetiver* a raíz desnuda con electrodos polarizables

Fuente: el autor.

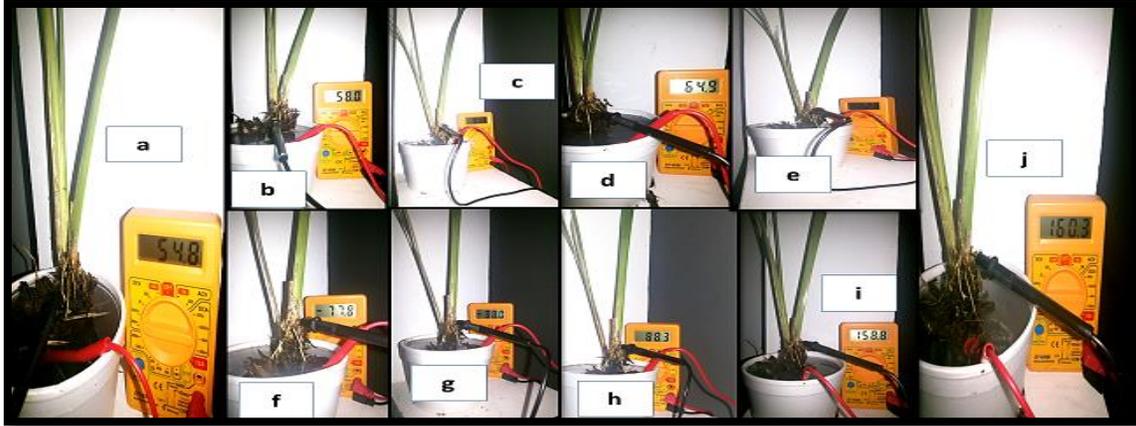


Figura 45. Rastreo de señales bioeléctricas con la especie *Vetiver* en contacto con sedimentos

Fuente: el autor.

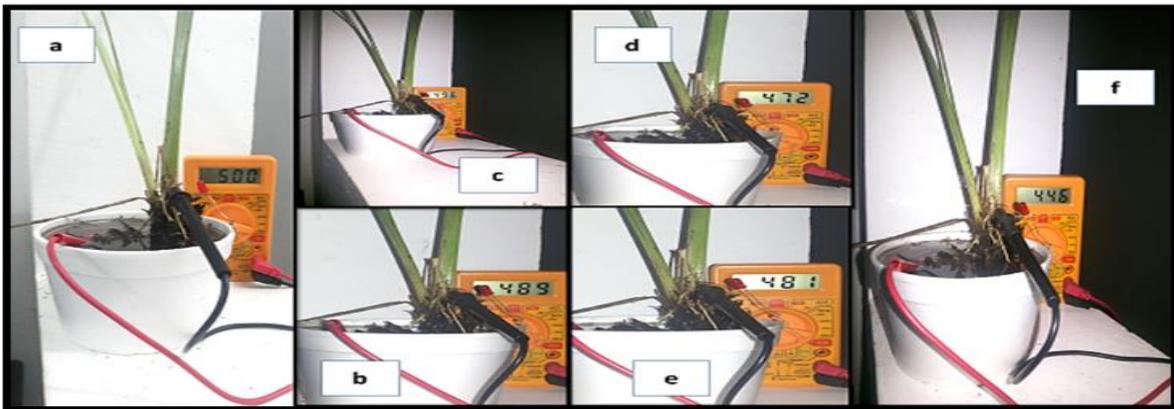


Figura 46. Rastreo bioeléctrico con la especie *Vetiver* con raíz en sedimentos en mV a las 24 horas

Fuente: el autor.

De tal modo, el rastreo bioeléctrico fue realizado durante una hora aproximadamente hasta lograr un registro estable de potencial. Tal como se ha referido, la estabilización de la celda toma tiempo, esto se debe a que los microorganismos deben adherirse al ánodo. En la toma de datos se pudo evidenciar un comportamiento inestable en el voltaje obtenido. La dinámica bioeléctrica cuando las raíces del *vetiver* entraron en contacto con el sedimento presentó mucha inestabilidad y fluctuación en las medidas de voltaje. Las plantas generan impulsos eléctricos lo suficientemente detectables. En el Instituto de Tecnología de Massachusetts están trabajando para averiguar si la energía de los árboles puede usarse para prevenir los incendios forestales. Un sistema de sensores aprovecha los árboles como fuente de alimentación autosustentable (Heuvel, 2008).

A continuación, se presentan algunas especies vegetales que han sido usadas de celdas de combustible con plantas con sus respectivos rendimientos bioelectricos (ver Tabla 16).

Tabla 25. *Potencial en celdas con vegetales*

<i>Oryza sativa</i>	0.4 – 1.5 mW/m ²	(Chen et al., 2012 como se citó en Goto et al., 2015)
<i>Lemna minuta</i>	10 -380 mW/m ²	(Hubenova et al. , 2012)
<i>Glyceria máxima</i>	21 -67 mW/m ²	(Strik et al., 2008 como se citó en Goto et al., 2015)
<i>Oryza sativa</i>	3.1 – 9 mW/m ²	(Bombelly et al ., 2013)

Fuente: el autor.

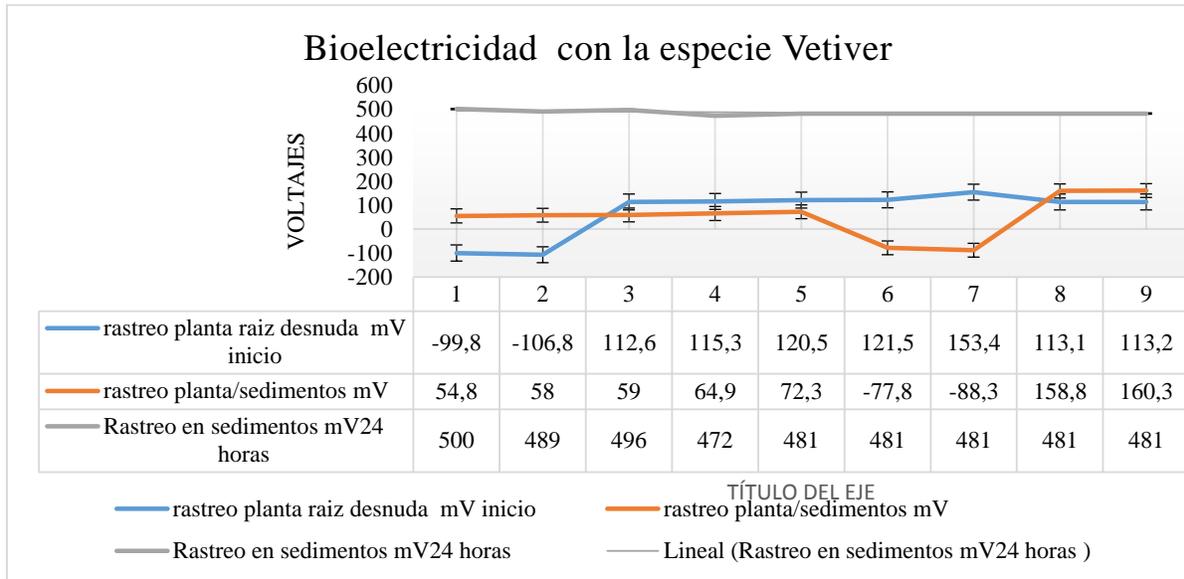


Figura 47. Consolidado de voltajes obtenidos con la especie *Vetiver* a raíz desnuda y en sedimentos.

Fuente: el autor.

Los impulsos eléctricos en las plantas constituyen un tema aun poco explorado que genera grandes inquietudes sobre el papel que puede desempeñar en la generación espontanea de gradientes electricos en el ecosistema. La información presentada en la Figura 47, constituye solo una aproximación a la evidencia del fenómeno, frente a lo que podría tener una significación mayor en el contexto de señales eléctricas biológicas como indicadores o respuestas a estímulos ambientales.

5.4.3 Comparación prototipo sedimentario y prototipo con plantas

Tomando en cuenta el rendimiento bioeléctrico. Potencia por unidad de Área” [W/ m²] la cual también puede expresarse en miliwatts por centímetro cuadrado [mW/cm²]. En ambos casos hubo fluctuaciones ocasionales de voltaje. En la tabla 26 de Presenta un cuadro comparativo de los aspectos que se consideran más relevantes en el desarrollo de biogeobaterias

Tabla 26. Comparación prototipo sedimentario y prototipo con plantas

Biogeobatería con plantas	Biogeobatería con sedimentos
Compuesta por seis miniceldas que en conjunto median 70 cm ² produjo un voltaje de 3.34 v.	Compuesta por 20 celdas produjo un voltaje de 10.93v en 1044 cm ² .
Si se le hace mantenimiento periódico es posible mantenerla encendida por más de un mes siempre y cuando no se seque el sustrato y los electrodos no se deterioren.	Si se le hace mantenimiento periódico es posible mantenerla encendida por más de tres meses siempre y cuando lo electrodos no se deterioren.
El amperaje para la biogeobatería con plantas fue 0.20w	El amperaje para la biogeobatería sedimentaria fue de 0.30
De acuerdo con la fórmula de $P = V * I$ el rendimiento de la biogeobatería con plantas fue de 0.668 W/ m ²	Según la fórmula de $P = V * I$ el rendimiento de la biogeobatería con sedimentos fue de: 3,279W/ m ²

Fuente: el autor.

Aplicando el pensamiento sistémico y considerando que el sinergismo en el ecosistema siempre está presente como una condición propia de la naturaleza que la hace más eficiente. En este caso, tratando de conservar ese principio, se considera que las biogeobaterias con plantas pueden llegar a ser mucho más estables y electroproductivas en el tiempo, a diferencia de las biogeobaterias sedimentarias, sobre todo al tener en cuenta que las especies vegetales poseen la capacidad de rizodepositar sustancias que al ser digeridas por los microorganismos, serias convertidas en electrones. Sin embargo las biogeobaterias sedimentarias aunque poseen una dinámica muy interesante desde el punto de vista biogeoelectrico, tienden a debilitarse ante la ausencia de alimentación, lo que conlleva a una disminución del complejo microbiano y por ende al desequilibrio del sistema biogeoelectrico.

5.5 Analizar la bioelectroremediación como alternativa biotecnológica

Desde la perspectiva biotecnológica, el uso de organismos vivos o sus derivados constituye la base de las estrategias para la producción de bienes y servicios. En este sentido, la biogeolectricidad como fenómeno es el resultado de la acción de microorganismos que degradan materia orgánica. Tal como se muestra en la figura 48 un flujo de entrada provoca un estímulo que induce el cambio en el Stock, la variable de estado biogeolectricidad se mide en microwatt y tiene un flujo de entrada denominado producción de biomasa.

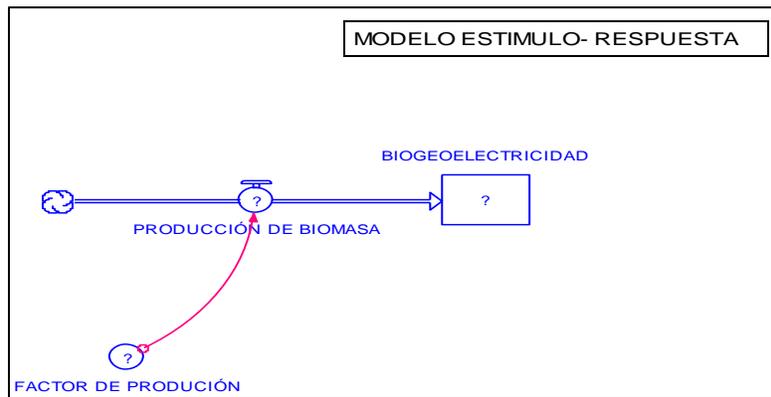


Figura 48. Diagrama de flujo Biogeolectricidad.

En este caso la alternativa biotecnológica estaría determinada calculando: la $Biogeolectricidad(t) = Biogeolectricidad(t-dt) + (producción\ de\ biomasa) * dt$.

No obstante también es posible que en el modelo la biogeolectricidad influya en su propio flujo de entrada como se representa en el modelo de auto-referencia de la figura 49.

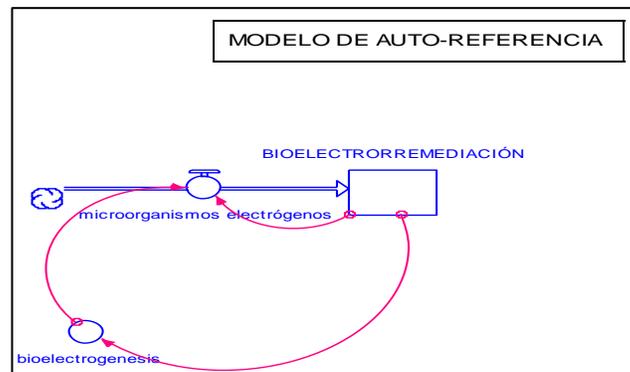


Figura 49. Diagrama de flujo Biogeolectricidad modelo de autorreferencia.

Cuando el proceso de bioelectrorremediación constituya el objetivo principal, es necesario establecer la diferencia entre la generación inicial y la final de biogeoelectricidad con relación a la actividad de los microorganismos en sus diferentes sinergias y roles metabólicos tal como se muestra en la figura 50.

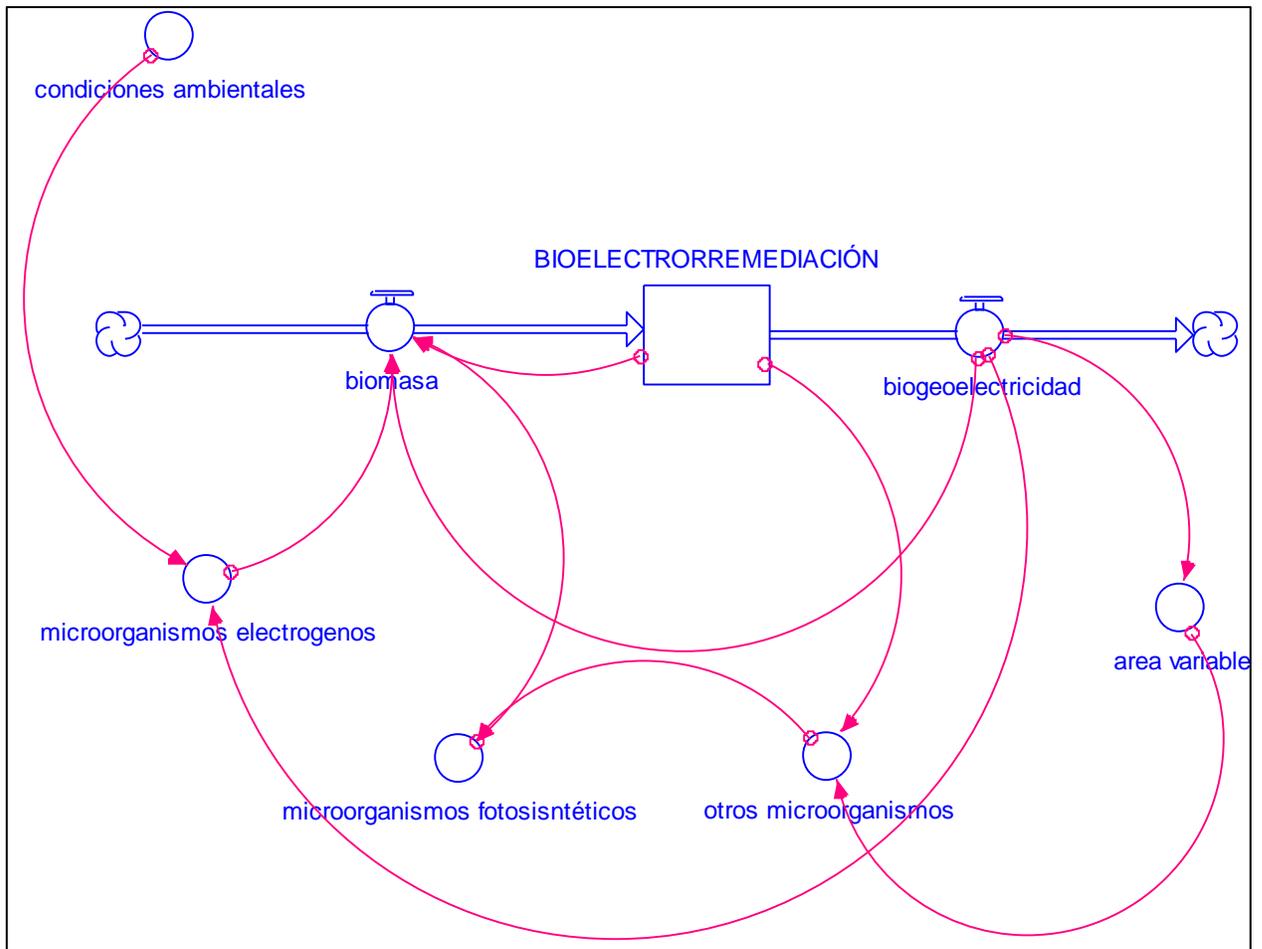


Figura 50. Diagrama de flujo Biogeoelectricidad en función de los microorganismos.

Otro escenario posible de la alternativa biotecnológica de la bioelectrorremediación estaría definido si el fenómeno en cuestión (variable de estado) se involucra con la densidad poblacional, junto con otras fuerzas. Lo cual se podría calcular como el cociente de número de microorganismos electrogenos por área.

CONCLUSIONES

Para determinar uso potencial de sedimentos provenientes de zonas aluviales de ecosistemas pantanosos y presentarlo como una alternativa biotecnológica ambiental, fue necesario asociar muchos campos del conocimiento, lo que le confiere a su vez, al presente estudio, una naturaleza transdisciplinar.

El fenómeno de la Bioelectroremediación fue identificado partiendo de una nueva perspectiva en donde la bioelectricidad es vista como una propiedad natural, característica en la dinámica de los suelos. Fue entendida como un proceso a través del cual la biotransformación de materia orgánica por parte de microorganismos genera un campo eléctrico que se manifiesta en forma de bioelectricidad espontánea. Se estudió a partir de una metodología de biogeoeléctro-prospección consistente en una serie de pasos y procesos que permitieron la medición de señales eléctricas en especies vegetales, la identificación de actividad biológica y eléctrica en sustratos, que conllevó a la construcción de dos prototipos biogeoeléctrotecnológicos con plantas y con sedimentos de manera sencilla.

El potencial bioelectrogénico del material sedimentario proveniente de zonas aluviales depende de una serie de factores que se pueden estudiar por medio de las biogeobaterías, al permitir analizar anomalías de autopotencia, cuya ausencia (>100 mV) se defiende la tesis que puede significar la imposibilidad de degradación de contaminantes presentes de manera natural.

Los elementos para un montaje bioeléctrico son: planta, suelo, raíces, bacterias, ánodo, membrana, resistencia, voltímetro, cátodo y electrón mediador. Aunque cabe resaltar que son muchos los factores que influyen en la generación de autopotenciales. Algunos dispositivos como las baterías de suelo (*earth battery*) aprovechan esta tipo de energía de baja densidad en forma de corriente continua.

La biogeobatería construida permitió encender un led con 3.4 V y 10 mA, en condiciones de un sustrato húmedo sin saturarse es posible mantener encendido un led por aproximadamente un mes, es decir, aproximadamente 720 horas, siempre y cuando no se deterioren los electrodos si estos son polarizables.

Se evidenció en los sistemas establecidos para el monitoreo bioeléctrico que los sustratos orgánicos no ofrecen inicialmente un voltaje significativo, sin embargo los que ya han pasado por

un ciclo de aclimatación y acople ofrecen un incremento gradual de potencial cuando se utilizan electrodos de grafito.

Por medio de una columna de Winosgradsky con electrodos de grafito fue posible conocer microorganismos foto-reactivos que hacen parte de los sustratos nativos. De igual manera se logró demostrar que los sedimentos clasificados por colores de acuerdo con la tabla Munsell registran voltajes diferentes, lo cual es de utilidad sobre todo si se tiene en cuenta que este atributo es un indicador de la composición mineralógica del sustrato.

Aunque las aguas residuales son un residuo líquido, vistas desde la perspectiva bioeconómica, se convierten en un recurso y por su parte los entornos contaminados por estas pueden albergar oportunidades científicas, tecnológicas y socioambientales. Desde una perspectiva de aplicación, la Bioelectroremediación constituye una alternativa bioelectrotecnológica que se contextualiza desde el paradigma bioeconómico al representar una vía para explotar nuevas oportunidades para incrementar la agregación de valor a la producción primaria y la diversificación, especialmente en sectores de manufacturas y energía.

La dinámica de sistemas, permite abordar los sistemas desde el punto de vista operacional, es decir que hace especial énfasis en el “cómo funciona. Esto significa comprender los mecanismos inherentes al sistema con sus respectivas relaciones causales. En este caso la bioelectrorremediación como procesos se puede analizar desde una perspectiva diferente en donde lo que siempre ha considerado como un problema pasa a ser visto como una oportunidad desde el escenario de la posibilidad de generación de biogeoelectricidad por acción microbiana en la degradación de materia orgánica. Este residual eléctrico recirculante en el ecosistema se constituye a su vez en un nuevo servicio ecosistémico inexplorado.

RECOMENDACIONES

Esta temática resulta interesante debido a que abre las posibilidades para el desarrollo de estrategias y nuevas líneas de investigación a nivel regional, puesto que se pudo evidenciar que aún existen muchos vacíos científicos y técnicos, por lo tanto se hace necesario articular la bioelectricidad al contexto de ciencia, tecnología e innovación desde la biomimética con base epistemológica. El monitoreo de ambientes por el método de tanques de generación de autopotenciales promete contribuir en el establecimiento de patrones de comportamiento bioeléctrico de un lugar determinado, por esta razón es necesario explorar sobre los mecanismos naturales de generación y conducción de electricidad en el ecosistema.

Además, generar nuevos intereses de investigación en temas como biomonitoreo o biosensores que permitan detectar, por medio de patrones eléctricos, variaciones en los valores normales de parámetros como temperatura, presión, pH, concentraciones de O₂ y CO₂, generación de sustancias volátiles, entre otros.

Al reconocer que el tipo de vegetación, la composición del suelo y la microbiota son factores determinantes en la generación de bioelectricidad, y por consiguiente, en el mecanismo de bioelectroremediación es importante cuestionarse sobre aspectos relacionados con el la totalidad del fenómeno de la contaminación en el medio, dado que en la naturaleza los contaminantes, siempre están en constante interacción con otras sustancias simultáneamente. Dentro de estos aspectos que se sugieren abordar están:

- La tasa de bioelectrogenesis, analizando el promedio de conversión de contaminantes en electricidad
- El proceso de bioelectrogenesis por el metodo de dinámica de sistemas
- Dinámica de la bioelectrogenesis desde el punto de vista bioelectrocinetico
- Extracción de bioelectricidad, en cuanto a mecanismos bioinspirados
- Tasa de extracción de bioelectricidad aplicando modelos de simulación
- Acumulación de bioelectricidad en el suelo desde el enfoque de la biocomplejidad
- Tasa de dispersión de la bioelectricidad aplicando modelos de simulación
- Tasa de bioelectricidad en el ecosistema por el metodo de dinámica de sistemas y aplicando modelos de simulación

Fuentes de financiación

Gobernación del departamento del Chocó a través de su programa de formación de alto nivel.

Universidad Tecnológica del Chocó, Grupo de Biotecnología Ambiental “BIOTAM”

Corporación Ecotecnológica Ambiental.

REFERENCIAS

- A.Revil, C.A Mendoca, E.A. Atekwana, B. Kelessa, S.S Hubbard. (2010). Understanding biogeochemical processes: Where geophysics meets microbiology. *Journal of Geophysical Research*, 1-22.
- Acuña. (2010). Biodegradation of petroleum and its derivatives by the bacterial community in the soil of the Argentinean Patagonia. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29-36.
- Adam, J. (1992). Les textes: types et prototypes. Nathan, París.
- Adams, R., y Domínguez, V., y García, L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 159-174.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Agencia SINC. (2015). *Los sedimentos de los ríos son una reserva dinámica de contaminantes*. Obtenido de Ciencia Naturales: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Los-sedimentos-de-los-rios-son-una-reserva-dinamica-de-contaminantes>
- Alatorre, M., Cortina, L., Campos, J. O., y Birch, F. S. (2008). Interpretación de anomalías de potencial espontáneo aplicada a un vertedero de desechos urbanos en el occidente de México. *e-Gnosis*, 6, 1-24.
- Romero, A., Vasquez, J; Lugo, A. (2012). Bacterias, Fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, 118-143.
- Alcaldía de Quibdó. (2016). *Plan de Desarrollo Municipio de Quibdó, 2016-2019 "Ruta que seguimos avanzando hacia la paz"*. Quibdó: Alcaldía de Quibdó.

- Guambo, A & Allauca, G. (2015). *Estudio de la Influencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de Aguas Residuales en la producción de Bioelectricidad en una Celda de Combustible Microbiano*. Riobamba- Ecuador : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Alvarado, J., Navarro, K., Terán, K., y Vizcarra, C. (2015). Electrobiorremediación, una técnica innovadora para la limpieza de suelos contaminados. *Revista Epistemus*, 96-99.
- Aprende en Línea. (s.f.). *La electroquímica*. Obtenido de http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/pluginfile.php/88969/mod_resource/content/0/modulo_7/modulo_6._Electroquimica.ppt
- Arboleda, D. (2009). *Electronica para la educación secundaria* . Bogotá: s/e.
- Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia del 4 de julio de 1991. Bogotá, D.C., Colombia.
- Asprilla, N. I. (2013). Desarrollo de un prototipo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante a aplicación de filtros vegetales con la especie (*Chrysopogon zizanioides*). Manizales, Colombia : Universidad de Manizales.
- Auge, M. (2008). *Métodos geoelectricos para a prospección de agua subterránea*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Barroeta, B., y Esteve-Núñez, A. (2015). *La columna bioelectrogénica: una herramienta para introducir conceptos de ecología microbiana y electroquímica en la educación secundaria*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Poblaciones-microbianas-con-sus-metabolismos-en-la-columna-de-Winogradsky_fig1_320495699
- Bastidas, C. (2016). *Habitat Integral Aldeano [Trabajo de Grado]*. Bogotá, D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Baztan MS, Pucci OH, Pucci GN. (2015). Electrobiorremediación de un suelo con una contaminación antigua de hidrocarburo. *Acta biol. Colomb*, 145-152.
- Benetton, X. (2010). Electrochemical evaluation of Ti/TiO₂-polyaniline anodes for microbial fuel cells using hypersaline microbial consortia for synthetic-wastewater treatment. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 1-6.

- Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by Nature*. Nueva York: HarperCollins Publishers.
- Bertalanffy, L. (1968). *General Systems Theory*. New York: George Braziller.
- Bertalanffy, V. L. (1976). *Teoría General de los Sistemas*. México: Fondo de Cultura.
- Bombelli, P., Rajaraman, D., Harrison, S., y Howe, C. (2012). Generation of current in vascular plant biophotovoltaic systems based on rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*). *Appl Microbiol Biotechnol*. 97 (1), 429-438.
- Bortolin, J. R. (2014). *Tesis doctoral : Metodos geoelectricos empleados en la caracterizacion y monitoreo de anomalias inherentes a infiltraciones controladas de vinaza*. Rio Claro : Instituto de Geociencias y Ciencia Exactas.
- Briceño, L.A y Leon, R. (1993). Los Potenciales Espontaneos: Aspectos Básicos y sus aplicaciones . *Geofisica Colombiana*, 21-24.
- Buenaño, J., y Cruz, F. (2016). *Generación de bioelectricidad mediante celdas de combustible microbianas a partir de aguas residuales industriales textiles de Fashion Color, utilizando Chlorella Vulgaris como biocatalizador en la Cámara Catódica, Pelileo 2015*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Buitrón, G., y Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 14 (1), 5-11.
- Buran, B., Butler, L., Currano, A., Smith, E., Tung, W., Cleveland, K., Buxton, C., Lam, D., Obler, T., Rais-Bahrami, S., Stryker, M. and Herold, K. (2003). Environmental benefits of implementing alternative energy technologies in developing countries. *Applied Energy*, 89-100.
- Cardona, W. V. (2016). Investigación Transdisciplinaria . *Dinámicas Y Métodos de la Investigación Transdisciplinaria* , (págs. 1-30).
- Carrato, A., y Marval, M. (2007). *Propuesta de un programa de educación ambiental para la conservación del agua y recolección de residuos sólidos, aplicable a las comunidades [Trabajo de Grado]*. Barcelona: Universidad de Oriente.

- Carreño, C. A. (2016). *Biotecnología Ambiental de Aguas y Aguas Residuales* . Bogotá: Ecoe .
- Casaño, C. D. (2016). Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería . *Revista Ingenium* , 43-46.
- Cegarra, J. (2004). Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid: Ediciones Díaz de santos.
- Chacín, B. (2008). Modelo Teórico- Metodológico para Generar Conocimiento desde la Extensión Universitaria . *Revista de Educacion Laurus* , 56-88.
- Chavarría, E. Q. (2016). *Potencial espontaneo asociado a la propagacion de fluidos en medios porosos*. Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia .
- Cheng, S., D. Xing, D. F. Call, and B. E. Logan. . (2009). Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis. . *Environ. Sci. Technol.*, 3953-3958.
- Cifuentes, O. (2007). *www.researchgate.net*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/48485859_Ingenieria_sanitaria_Ingenieria_de_procesos_Tratamiento_de_agua_y_efluentes_industriales
- Cisneros, F. H. (s,f). *hortintl.cals.ncsu.edu*. Obtenido de Conceptos sobre rendimientos: <https://hortintl.cals.ncsu.edu/es/content/conceptos-sobre-rendimientos>
- CODECHOCÓ. (2013a). *Informe de Gestión Vigencia 2013*. Quibdó: CODECHOCÓ.
- CODECHOCÓ. (2013b). *Informe anual sobre el estado de los recursos naturales y del medio ambiente departamento del Chocó 2012*. Quibdó: CODECHOCÓ.
- CODECHOCO. (2016). *PLAN DE ACCION 2016 -2019*. Quibdó.
- Colciencias. (2016). *Planes y Acuerdos Estratégicos Departamentales en CTeI - PAED*. Obtenido de Gestión Territorial : <https://www.colciencias.gov.co/portafolio/gestion-territorial/planes-de-acuerdo/listado-pedcti>
- Congreso de Colombia. (1994). Ley 143 del 11 de julio de 1994. Diario Oficial No. 41.434. [Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional]. Bogotá, D.C., Colombia.

- Congreso de Colombia. (2001). Ley 697 del 3 de octubre de 2001. [Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones]. Bogotá, D.C., Colombia.
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 del 13 de mayo de 2014. [Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional]. Bogotá, D.C., Colombia.
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 del 13 de mayo de 2014. Diario Oficial No. 49.150. [Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional]. Bogotá, D.C., Colombia.
- Consejo de Tecnología y Regulación Interestatal- ITRC. (2017). *Gestión de remediación de sitios complejos*. Washington, DC: RMCS-1.
- Constantini, A. (2010). *Plantas nómadas*. Obtenido de Exposiciones: <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/resenas/exposiciones/exposicion.asp?id=136>
- Constructora y Consultora DAVINCI. (2016). *Estudios de suelos para la rehabilitación del teatro municipal "Cesar Conto Ferrer" en la Ciudad de Quibdó*. Bogotá.
- Contraloría General del Departamento del Chocó. (2012). *Informe del estado de los recursos naturales y del medio ambiente*. Quibdo : Contraloria General del Departamento del Chocó .
- Corace, J. (2010). *Entropía*. Obtenido de Termodinámica. tema 1: <http://ing.unne.edu.ar/pub/termodinamica/TC1Y2-2010.pdf>
- Corwin, R. (1990). The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications. *Geotechnical and Environmental Geophysics*: , 127-146.
- Cox C,D.,Shoesmith M.A y Ghosh M.M. (1996). Electrokinetic remediation of mercury - contaminated soil using iodine/ iodine lixiviant. *Environ. Sci. Technol*, 1933-1938.
- Pérez et al. (2007). Electrorremediación de Suelos Contaminados, Una revision Tecnica para su Aplicación en Campo. *Contaminación Ambiental*, 129-138.
- Daghio et al. (2016). Electrobioremediation of oil spills. *Water Research*, 351-370.

- Departamento Nacional de Planeación . (14 de enero de 2015). *www.dnp.gov.co*. Obtenido de Diálogo regional para la construcción del plan nacional de desarrollo 2014 -2018: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaciones/Encuentro%20Regional%20Quibd%C3%B3%2013102015.pdf>
- Dioses, J. (2015). *Plantalámparas: Así Funcionan Las Plantas Que Dan Luz*. Obtenido de <https://www.oyejuanjo.com/2015/10/plantalamparas-plantas-que-dan-luz.html>
- Disalvo, A. (2015). *La biofísica como base innovadora de la nanobiotecnología*. Obtenido de Conicet: <http://faa.unse.edu.ar/pdf/Biofisica-Disalvo.pdf>
- Domínguez, J., Román, A., Prieto, F., y Acevedo, O. (2012). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 141-155.
- Duarte, J. M. (s,f). *Enfoque Sistémico en la Investigación de Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de revistacientifica.fce.unam.edu.ar:
http://revistacientifica.fce.unam.edu.ar/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1&Itemid=
- ECO Portal. (2014). *Soil Lamp: Enciende la luz con la energía del suelo*. Obtenido de Europa: https://www.ecoportel.net/paises/europa/soil_lamp_enciende_la_luz_con_la_energia_del_suelo/
- El Tiempo. (2016). *Las cifras que tienen indignado al Chocó*. Obtenido de www.eltiempo.com:
<http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/las-cifras-que-tienen-indignado-al-choco-28264>
- El-Naggar, M., Wanger, G., Man, K., Yuzvinsky, T., Southam, G., Yang, J., y ... Gorby, Y. (2010). Electrical transport along bacterial nanowires from *Shewanella oneidensis* MR-1. *PNAS*, 107 (42) , 18127-18131.
- Encinas, N. (2011). *Medio Ambiente y Contaminación. Principios Básicos, 1era edición*. Madrid: ADDI.
- Escalante, J. M. (2005). Principio de precaución y Medio Ambiente. *SciELO* , 133-144.

- Escobar, j. (2002). *la contaminacion de los rios y sus efectos en las areas costeras* . Santiago de Chile : Cepal.
- Escuela de Organización Industrial. (2014). Pilas de Combustible. *Conceptos y estado tecnológico* .
- Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. (s.f.). *Métodos Eléctricos de Prospección* . Obtenido de <http://catedras.fcaglp.unlp.edu.ar/geofisica/metodos-electricos-de-prospeccion/teoria-1/potencial-espontaneo.3>
- Farina, L. (s.f.). *Corriente continua: introducción*. Obtenido de Nota técnica: http://editores-srl.com.ar/revistas/ie/309/farina_corriente_continua
- Fernandez, M. A. (2012). Actividad Electrogenerica de Lodos del lago de la Universidad del Valle. *Revistas de Ciencias Universidad del Valle*, 161 -167.
- Flores, E. (2015). *Plant-e: energía a través de plantas ecológicas*. Obtenido de <https://www.ecologiahoy.com/plant-e-energia-a-traves-de-plantas-ecologicas>
- Gaian Life. (2012). *Earth Battery 101*. Obtenido de Archivos: <https://gaianlife.wordpress.com/2012/07/>
- Galán, C. (2016). *Patrones y estructuras disipativas en cuevas y geoformas del pseudokarst de jaizkibel*. Obtenido de <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2016/02/patrones-de-la-naturaleza-aplicados-al.html>
- Galati, E. (2017). El Pensamiento Complejo y Transdisciplinario como Marcos de Investigación Científica. *RELMECS*.
- Ganigué, R., S. Puig, P. Batlle-Vilanova, M. D. Balaguer, and J.Colprim. (2015). Microbial electrosynthesis of butyrate from carbon dioxide. *Chem. Commun.*, 3235-3238.
- García, A. L. (2015). *Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo*. Universidadd Autonoma Metropolitana .
- García, L., Vargas, M., y Reyes, V. (2010). Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y acido acético como electrolitos. *Superficies y Vacío*. 24 (1) , 24-29.

- García, M. E. (2014). Criterios Tecnológico - Ambientales bajo un Enfoque Sistemico: Transferencia de Tecnología Química . *Scielo (Ingeniería, Investigación y Tecnología)*, 339-350.
- García-Navarro Josefina, Bautista-Vargas María Esther, Pérez-Bravo Sheila Genoveva y Carrillo Loera Miguel Ángel . (2015). Determinación de la materia orgánica en sedimentos de lagunas costeras para la factibilidad del uso en una celda de combustible microbiana para generación de energía sostenible. *Energía Química y Física*, 15-26.
- Gaviria, C., Ochoa, C., Sánchez, N., Medina, C., Lobo, M., Galeano, P., y ... Rojano, B. (2009). Actividad antioxidante e inhibición de la peroxidación lipídica de extractos de frutos demortino (*Vaccinium meridionale SW*). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, (págs. 519-528).
- Gavito, M., der Walb, H., Aldasoro, M., Ayala-Orozco, B., Atenea, A., Cach-Pérez, M., Villanueva, G. (2017). Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88 (1), 150-160.
- Germán Buitrón, Jaime Perez. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 5-11.
- Gil, P., Gurovich, L., Schafffer, B., Alcayaga, J., y Iturriaga, R. (2007). Medición de señales eléctricas como herramienta de monitoreo de respuestas del palto (*Persea americana Mill.*) ante el contenido de agua en el suelo. *Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate)* (págs. 1-10). Viña del Mar, Chile: Congreso Mundial del Aguacate.
- Gonzales, A. R. (2016). Inter y Transdisciplinariedad en Investigaciones Ambientales. Una sinopsis. *Gestión y Ambiente* , 318-331.
- Gonzales, S., Toro, S., Contreras, J., Ramírez, A., y Ruiz, D. (s.f.). *Columna de Winogradsky*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/178837281/Laboratorio-Columna-de-Winogradsky-TERMINADO>

- Goto, Y., Yoshida, N., Umeyama, Y., Yamada, T., Tero, R., y Hiraishi, A. (2015). Enhancement of Electricity Production by Graphene Oxide in Soil Microbial Fuel Cells and Plant Microbial Fuel Cells. *Front Bioeng Biotechnol.* 3 (42), 1-8.
- Gretel, N. (2016). *Análisis técnico – económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la producción de energías alternas [análisis técnico – económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la producción de energías alternas.* Santiago de Queretaro: CIDETEQ.
- Hall-stoodley et al. (2004). Bacterial Biofilm: from the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*, 95 - 108.
- Handelsman. (2004). Application of genomics to uncultured Microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 669-685.
- Harbottle M.J, G. Lear, G.C. Sills, et al. (2004). The effect of electrokinetics on soil microbial communities. *Soil Biology y Biochemistry*, 1751–1760.
- Harish D, T S Dhabalakshmi, Gireesh H R . (2016). Power Supply Using Earth Battery . (*ITSI-TEEE*) *Transactions on Electrical and Electronics Engineering* , 2320 – 8945.
- Helder, M. (2012). *Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application [Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of doctor]*. Wageningen: Wageningen University.
- Hernandez, F. A. (2012). *Metodos Geoeléctricos Aplicados a la Explotación de Aguas Subterráneas y Termas*. Concepción, Chile : Universidad de Concepción Chile .
- Hernandez, X. C. (2017). *La Bioprospección de microorganismos en Colombia como uso sostenible de la biodiversidad* . Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingenierías .
- Hernandez,G. y Sanchez, M. (2017). La plurifuncionalidad de las bacterias electrogénicas . *Universitarios Potosinos* , 4-10.
- Hinestroza, L., Quejada, Y., y Rivas, W. (2016). Análisis de la participación ciudadana en el otorgamiento de permisos de aprovechamiento forestal en el Chocó 2009 - 2013. *Revista CES Derecho.* 7 (1), 11-26.

- Holdridge, I. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. San Jose: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).
- Holmes, D., Bond, D., O'Neil, R., Reimers, C., Tender, L., y Lovley, D. (2004). Microbial Communities Associated with Electrodes Harvesting Electricity from a Variety of Aquatic Sediments. *Electrodeassociated communities*, 48(2), 178–190.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la Investigación Holística*. Caracas: Fundación Sypal.
- iCrowdNewswire. (2016). *Wire*. Obtenido de Home: <http://icrowdnewswire.com/2016/07/20/e-kaia-dispositivo-portatil-que-por-medio-de-un-biocircuito-capta-y-transforma-en-electricidad-la-energia-de-plantas/>
- IDEAM. (s,f). *El IDEAM y la gestión integral de recurso hídrico*. Obtenido de http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/237324/Nelson+Vargas_IDEAM.pdf
- IIAP. (2013). *Plan Estratégico de la Macrocuena del Pacífico*. Quibdó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico .
- METland. (09 de Marzo de 2018). *iMETland*. Obtenido de <http://imetland.eu/>
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico . (2014). *Diagnostico Ambiental del Botadero a Cielo Abierto Marmolejo de la Ciudad de Quibdó, con Miras al Aprovechamiento Forestal Unico*. Quibdó .
- Jahn, T., Bergmann, M., y Keil, F. (2012). Transdisciplinarity: between mainstreaming and marginalization. . *Ecol. Econ.* 79, 1-10.
- Jaramillo, D. F. (s.f.). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín 2002: Universidad Nacional de Colombia.
- Jasso, G. M. (2016). La apropiación de la naturaleza como recurso. Una mirada reflexiva . *Gestión y Ambiente* , 141-154.
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., y Watanabe, K. (2008). Microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Appl Microbiol Biotechnol.*, 79, 43–49.
- Kesie, K. I. (2011). El principio de precaución en la. *Actualidad Jurídica* , 22-29.

- Khan, N., Saleem, N., y Abas, N. (2008). *Experimental study of earth batteries*. Pakistán: Second International Conference on Electrical Engineering. University of Engineering and Technology, Lahore .
- Kumar, b, P. Chiranjeevia, b, Sai Kishore Buttia, b, S. Venkata Mohana,. (2018). Self-Sustained Photocatalytic Power Generation using Eco-Electrogenic Engineered Systems. *Elsevier* , 1-18.
- Laso, J. F. (2011). Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados. *Trabajo de fin de carrera previa a la obtención del título de Ingeniero Civil*. Loja , Ecuador : UTPL.
- Lear G., M.J. Harbottle,C.J. van der Gast, et al. (2004). The effect of electrokinetics on soil microbial communities. *Soil Biology y Biochemistry*. *Soil Biology y Biochemistry*, 1751–1760.
- Lira, C. A. (2016). *cdigital.uv.mx*. Obtenido de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/41486/1/AguileraLiraCitlali.pdf>
- Loaiza, A. V. (2018). *Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Sección Infraestructura: <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schoder, U., Keller, J.,Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K. (2006). *Microbial Fuel Methodology and Technology*.
- Lopes, R. J. (2010). Bacterias electrizantes . *Pesquisa Fapesp*, 1-4.
- López, I. (2013). *Implementación de una estrategia de control para la puesta en marcha de una celda de combustible microbiana*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Madigan, T., Martinko, M. J., y Clark, P. (2010). *Brock Biology of Microorganisms*. Upper Saddle River, NJ.: Pearson Prentice Hall.
- Malagón, D. (2002). *Los suelos de Colombia*. . Bogotá, Colombia: Sociedad Geográfica de Colombia.

- Martínez et al . (2015). 'Influence of anthropogenic inputs and high-magnitude flood event on metal contamination pattern in surface bottom sediments from the Deba River urban catchment'. *Science of the Total Environment (STOTEN)*, 10-25.
- Martinez et,al. (2012). Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. *Acta agronomica* (págs. 97 -98). Palmira : Universidad Nacional de Colombia.
- Martinez, M. (1993). El Paradigma Emergente: hacia una nueva teoría de la racionalidadEl Paradigma Emergente: hacia una nueva teoría de la racionalidad. Barcelona, España: Gedisa.
- Matos, N. E. (2008). la interdisciplinarietà y Transdisciplinarietà en las ciencias: Una mirada a la teoria bibliològico- informativa. *Acimed* .
- Maturana, Z. (2007). Mapa de zonificación de amenazas por inundación del casco urbano del municipio de Quibdó (Chocó). Estudio basado en la interpretación de imágenes de radar, de satélite y fotografías aéreas. *Ingeniería e Investigación*. 27 (3), 24-34.
- McLean, J., Wanger, G., Gorby, Y., Wainstein, M., McQuaid, J., Ishii, S., y ... Nealson, K. (2010). Quantification of electron transfer rates to a solid phase electron acceptor through the stages of biofilm formation from single cells to multicellular communities. *Environmental Science y Technology*. 44 (7), 2721-2727.
- Medina y Zapata . (2017). Evaluacion de la Producción de Energía Electrica y Disminución de DQO en Agua Residual Sistetica Mediante Celdas de Combustible Microbianas a Escala Laboratorio. Bogotá: Fundación Universidad de América.
- Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., y Naidu, R. (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. . *Environment International*, 37, 1362-1375.
- Melgarejo et al . (2002). *Aproximación al estado actual de la bioprospeccion en Colombia*. Bogotá: Serie de Documentos Generales INVEMAR.

- Mendonca, C. A. (2016). Experimentos com biogeobaterias em sedimentos com metano biogenicos . Sao Pablo , Brazil : Instituto de Astronomia, Geofisica e Ciencias Atmosfericas (IAG).
- Michel, M. (2009). *Complexity: a Guided Tour*. New York: Oxford University Press.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystem and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000. [Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS]. Bogotá, D.C., Colombia.
- Minsley, B.J., J. Sogade, and F.D. Morgan. (2007). Three-dimensional self potential inversion for subsurface DNAPL contaminant detection at the Savannah River Site, South Carolina. *Water Resour.*
- Misteli, T. (2001). The concept of self-organization in cellular architecture. *The Journal of Cell Biology*, , 155(2), 181–185.
- Mitchell, C. P. (2000). Development of decision support systems for bioenergy applications. *Biomass and Bioenergy*, 265-278.
- Mohn, E. (2017). Bioelectrogenesis (Bioelectricity). Encyclopedia of Science.
- Mohn, E. (2017). Bioelectrogenesis (bioelectricity). *Encyclopedia of Science*.
- Moncada, M., De la Cruz, D., y Pinedo, C. (2011). Los campos bioeléctricos y algunas aplicaciones médicas. *Ingeniería Biomédica*, 50-59.
- Montes, C. E. (2010). *Metodología de la Investiigación Tecnológica, Pensando en sistemas* . Huancayo - Perú .
- Morales, P. M. (2011). La cooperación internacional para el desarrollo como mecanismo de gestión ambiental Aproximación teórica a la estructura de Gestión Ambiental Global. *Gestrion y Ambiente* , 129-142.
- Nakamura, R. (s.f.). *Center For Sustainable Resource Science* . Obtenido de <http://www.csr.riken.jp/en/labs/bcrt/index.html>

- Nakamura, R., Takashima, T., Kato, S., Takai, K., Yamamoto, M., y Hashimoto, K. (2010). Electrical Current Generation across a Black Smoker Chimney Angewandte. *Angewandte Chemie International*, 7692-7694 .
- Naudet, V., Revil, A., Bottero, J., y Bégassat, P. (2003). Relationship between self- potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*. 30 (21), 1-3.
- Nevin, K. P., T. L. Woodard, A. E. Franks, Z. M. Summers y Lovley, D. (2010). Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compound. *mBio*, 03-10.
- Nils et al. (2015). Cable Bacteria in Freshwater Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 6003-6011.
- Núñez, A. E. (2015). iMETland. Humedales Electroquímico Microbianos para descentralizar el tratamiento de agua residual . España .
- Ojeda. (2000). *Informe Nacional sobre la gestion de agua en Colombia*. Santa fe de Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura . (2018). *www.fao.org*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Organizacion de Naciones Unidas . (2014). Conferencia Anual 2014 de ONU Agua en Zaragoza. Preparando el Día Mundial del Agua 2014., (págs. 1-8). zaragoza.
- Ortiz, J., Masera, O., y Fuentes, A. (2014). *La Ecotecnología en México*. México, D.F.: Unidad de Ecotecnologías de la Universidad Autónoma de México.
- Otálvarez, G. (16 de Marzo de 2011). *El Modelo Teórico como Construcción Mental del Conocimiento en la Tesis Doctoral*.
- Pacheco, L., Padró, D., Dávila, W., Álvarez, S., y Gómez, P. (2015). Reseña histórica sobre las llamadas terapéuticas biológicas. *Norte de salud mental*, 13(52), 89-99.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C. and Kothari, S., . (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review; . *Renewable and*, 1513-1524.

- Penas, S. (s.f.). *Informática*. Obtenido de <http://www.profesorsebastian.com.ar/factoresbioticosyab.htm>
- Pérez. (2008). Índice Físicoquímico de la calidad de Agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. . *Revista de Biología Tropical*.
- Perez, G. S. (2002). Desarrollo y Medio Ambiente Una Mirada a Colombia. *Enomía y Desarrollo* .
- Pérez, J. (2016). *Determinación del contenido de materia orgánica en suelos pardos mullidos medianamente lavados* . Obtenido de Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ingeniería Agrícola: <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6578/tesis%20%20Javier.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pintado, M. A. (s,f). *Publicacionesdidacticas.com*. Obtenido de Energía Verde. La electricidad en la naturaleza: <http://publicacionesdidacticas.com/hemeroteca/articulo/007087/articulo-pdf>
- Potter, M. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proc. R. Soc. Lond*, 260-276.
- Prieto, I. D. (2013). *Implementacion de un estrategia de control para la puesta en marcha de una celda de combustible microbiana*. Mexico : Universidad Autonoma de Mexico .
- Programa de Agua y Saneamiento, Banco Mundial. (2012). *www.wsp.org/*. Obtenido de Viviendo sin alcantarillado,El negocio de la recolección de lodos fecales en: <https://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/WSP-TP-SPA-Viviendo-Sin-Alcantarillado-Sanitario-March2012.pdf>
- Pucci G.N., A. A. (2013). *Electro bioremediación*. Rev. peru.biol.
- Pucci, G., Acuña, A., y Pucci, O. (2013). Electro bioremediación de fondos de tanques petroleros. *Revista Peruana de Biología*. 20 (2), 199-201.
- Quintero et al. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Gestión y Ambiente*, 51-64.

- Rabaey, K., and R. A. Rozendal. (2010). Microbial electrosynthesis - revisiting the electrical route for microbial production. *Nat. Rev. Microbiol.*, 706-716.
- Rahimnejad, M., Najafpour, G., y Asghar, A. (2011). *Effect of Mass Transfer on Performance of Microbial Fuel Cell*. Rijeka: InTech.
- Ramos, E. P. (2017). *Disminución de la concentración de plomo en el suelo con la técnica de biorremediación en una celda construida en el laboratorio*. Torreón. Coahuila: Universidad Autónoma Agraria .
- Ramos, R. (2015). Saberes campesinos locales para la interdisciplinariedad educativa rural. *Itinerario Educativo*. 65, 163-195.
- Remtavares . (19 de diciembre de 2012). <http://www.madrimasd.org>. Obtenido de Pilas de combustible microbianas de agua residual. Un poco de historia.: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/12/19/131838>
- Restrepo y Kjerfve. (2004). he Pacific and Caribbean Rivers. *Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments*, 169-187.
- Restrepo et al., (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad . *Ciencias de la tierra* , 527- 546.
- Revelo, D., Hurtado, N., y Ruiz, J. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un reto para la Remoción de la Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17-28.
- Revil, A., C. A. Mendonça, E. A. Atekwana, B. Kulesa, S. S. Hubbard, and K. J. Bohlen. (2010). Understanding biogeochemical cells: Where geophysics meets microbiology. *J. Geophys.*, 1-22.
- Revil, A., Fernández, P., Mao, D., French, H., Bloem, E., y Binley, A. (2015). Self-potential monitoring of the enhanced biodegradation of an organic contaminant using a bioelectrochemical cell. *The Leading Edge*. 34 (2), 198-202.
- Riechmann, J. (s,f). Biomimesis: Un concepto clave para pensar la sustentabilidad . *El Ecologista* , 1-11.
- Rodrigo, J. (2016). *Bioelectroventing: cleaning-up polluted sites using electrodes to simulate microclor [PHD Tesis]*. Obtenido de Universidad de Alcalá. Departamento de

Química Analítica, Química Física e Ingeniería Química:
<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=201bnkMKJ7g%3D>

- Rodriguez, N. y A Ramirez . (2014). Ptorotocolo de valuación visuaol de qurebradas para Puerto Rico. Rio piedrad: Universida de Puerto Rico.
- Rojas, E. H. (26 de Mayo de 2011). Concepto y Eestrategias de biorremediación. *inge UAN*, 20-29.
- Rossi, M. M. (2004). Materia Orgánica: Su utilización en la evaluación de la calidad del suelo en sistintos ambiente del sur de Santa Fe. *Informaciones Agronomicas del Cono Sur* , 9-24.
- Ruelas, R. (s.f.). *Sistemas de puesta a tierra - teoría diseño medición y mantenimiento*. Obtenido de Notas: <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>
- Ruiz, K. (2016). *Celdas de combustible microbiano*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/kevinalejandruruizbalcazar/celdas-de-combustible-microbiano>
- Ryeczek. (1984). "U.S Patente n° 4,457,988.
- Ryeczek, J. (1984). *Estados Unidos Patente n° 4,457,988*.
- Sachs, J. (2016). *La era del Desarrollo Sostenible* . Bogota : Planeta Colombiana S.A.
- Salgado, C. (2009). Microbial fuel cell powered by geobacter sulfurreducens. *Basic Biotechnhonology* , 96-101.
- Sanz, D. (2012). *Lámpara alimentada con plantas*. Obtenido de Blog: <https://ecologismos.com/lampara-alimentada-con-plantas/>
- Sardá, j. (2000). *ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS*. Obtenido de <https://ddd.uab.cat/pub/edlc/02124521v18n3/02124521v18n3p405.pdf>
- Saval, S. (1999). Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos. En C. S. (eds.), *Conservación y restauración de suelos*. (págs. 511-526). México: Puma-UNAM.
- Sepulveda, N. (2015). Una visión sistemica y termodinamica de la contaminacion ambiental con naturaleza electrolitica. *Revista Asuntos*, 59-67.

- Sepúlveda, N. (2015b). Estudio de la bioelectricidad y su potencial aplicación como biotecnología ambiental emergente en el contexto del departamento del Chocó. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1, 457-462.
- Serna, C. (2016). *Territorio y Desarrollo Sostenible, 1a. edición*. México, D.F.: Ediciones de la U.
- Siddiqui, A. y Fleten, S.-E., . (2010). How to proceed with competing alternative energy technologies A real options analysis. *Energy Economics*, 817-830.
- Sill, W. (1983). Self- potential modeling from primary flows. *GEOPHYSICS*, 48(1), 76-86.
- Sill, W. (1983). Self-Potential modeling from primary flows. *Geophysics*, 76-86.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC]. (s.f.). *Estructura ecológica principal de la región del chocó biogeográfico colombiano*. Obtenido de https://siatpc.iiap.org.co/docs/avances/estructura_ecologica_principal_de_la_region_del_choco_biogeografico_colombiano.pdf
- Srebotnjak, T. and Hardi, P. (2011). Prospects for sustainable bioenergy production in selected former communist countries. *Ecological Indicators*, 1009-1019.
- Tan, T. (1996). Cardanol–lignin- based polyurethanes. *Polymer International*. 41 (1), 13-16.
- Torres, P. (2012). Perspectivas del Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales Domesticas en Paise en Desarrollo . *EIA*, 115-129.
- Troschinetz AM, Mihelcic JR. (2009). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Manage*, 915-923.
- Troschinetz, A. M.; y Mihelcic, J. R. (2009.). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. Waste. En *Waste* (págs. 915 -923).
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. Paris : Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los recursos Hidricos de la Naciones Unidad*. Organizacion de las Naciones Unidad para la Educación la Ciencia y la Cultura .

- Universidad de Manizales . (2016). *Territorio y Desarrollo Sostenible*. Mexico: Ediciones de la U.
- Universidad de Salamanca. (s.f.). *Características de las aguas residuales*. Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. (2016). *Celdas de combustible microbiana: electricidad por desechos orgánicos*. México, D.F.: Escuela Nacional Colegio de Ciencias y Humanidades .
- Universitat Politècnica de Catalunya. (s.f.). *Tema 4: Potencial Espontáneo* . Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/08.pdf?sequence=9&isAllowed=y>
- Unzueta, J. (2010). *Tratamiento de suelo contaminado con HTP's en un sistema de electrobiorremediación con recirculación*. Durango, México: Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.
- Unzueta, J., Soto, C., Martínez, M., Pinto, J. C., y Hernandez, F. (2007). Electroremediation: A novel technology for the remediation of contaminated soils. . *Proceedings of Chemical Engineering International Symposium*, 102-106.
- Valencia, N. R. (2014). Modulo Doctorado en Desarrollo Sostenible . *Agua y Desarrollo Sostenible*. Manizales , Colombia: Univeridad de Manizales .
- Van de Velde, S. (2016). The Impact of electrogenic sulfur oxidation The Biogeochemistry of Coastal sediments: A fiel study. *ELSEVIER*, 211-232.
- Velásquez, L., y D´Armas, M. (2015). El ingeniero con conciencia social. Una posibilidad para el desarrollo sostenible. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 19 (74), 25-38.
- Wei, S. (2009). *Investigating The Biogebattery Model For Field Spontaneous Potential (SP) Signatures Over An Organic Rich Plume At he Norman Landfill*. Ok. FUXIN, LIAONING,CHINA: Oklahoma State University.
- Whitesides, G. M. (2015). Bioinspiration: something for everyone. *Interface Focus*, 5.
- Wick L.Y., L. Shi y H. Harms. (2007). Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions. *Electrochimica*, 3441–3448.

- World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva: WHO.
- WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París: UNESCO.
- Yasa, I., Cadirci, B., Kocyigit, A., and Öztürk, T. (2006). Enrichment and isolation of anoxygenic phototrophic bacteria in Winogradsky column. *Journal of*, 71-73.
- Zerta, M., Schmidt, P. R., Stiller, C. and Landinger, H.,. (2008). Alternative World Energy Outlook (AWEO) and the role of hydrogen in a changing energy landscape; . *International Journal of Hydrogen Energy*, 3021-3025.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis microbiológico realizado al agua residual proveniente del pozo séptico del bloque 8 de la universidad tecnológica del chocó utch.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE SALUD DEL CHOCÓ
LABORATORIO DEPARTAMENTAL DE SALUD PÚBLICA
LABORATORIO RIESGOS DEL AMBIENTE

ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha de recibo: Julio 24 de 2017
Remitida por: NIZA SEPULVEDA
Punto de toma: Universidad Tecnológica del Choco
Sitio de toma: Bloque 8 pozo septico Muestra No. 1
Bloque 8 pozo septico Muestra No. 2
Muestra: Agua residual
Localidad: Quibdó
Fecha de toma: Julio 24 de 2017
Para: Análisis Físico Químico y Microbiológico

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

PARÁMETROS	MUESTRA N° 1	MUESTRA N° 2	
MESÓFILOS	-	-	
COLIFORMES TOTALES	6500000	628600	
COLIFORMES FECALES	142000	133000	

*Método: Filtración por membrana

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PARÁMETROS	EXPRESAD O COMO	MUESTRA N° 1	MUESTRA N° 2	
OLOR Y SABOR		Desagradable	Desagradable	
✗ COLOR	UPC	42.81	30.57	
✗ Ph	U-Ph	6.57	7.46	
✗ TURBIEDAD	U.N.T.	78.50	67.32	
CONDUCTIVIDAD	Us/cm	245	320	
CLORO RESIDUAL LIBRE	mg/L Cl ₂	-	-	
CLORUROS	mg/L Cl ⁻	99.60	94.90	
DUREZA TOTAL	mg/L CaCO ₃	174.20	164.41	

Carrera 8 No 11-109 Barrio Niño Jesús sector Cabí
Teléfono 6711471 Telefax 6719805
Quibdó

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE SALUD DEL CHOCÓ
 LABORATORIO DEPARTAMENTAL DE SALUD PÚBLICA
 LABORATORIO RIESGOS DEL AMBIENTE

NITROGENO TOTAL	mg/L N	65.84	53.82	
HIERRO TOTAL	mg/L Fe	3.16	1.98	
SULFATOS	mg/L SO_4^{-2}	-	-	
FÓSFORO TOTAL	mg/L P	9.54	8.45	
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L $CaCO_3$	198.10	186.33	
SUSTANCIAS FLOTANTES	Ausentes	Presente	Presente	
* SÓLIDOS SUSPENDIDOS TO	Mg.S.S.T-L	72.86	68.34	
* DQO TOTAL	Mg/L	354.96	298.35	
* DBO TOTAL	Mg/L	167.80	158.28	
* GRASAS Y/O ACEITES	Mg/L	19.92	17.30	

Químico

Ivonne Chaves Arriaga
 Nombre
 cc 8310571 de Medellín

Anexo 2. Prototipos biogeoelectrónicos de referencia

Planta Nómada Las plantas nómadas, son “un prototipo de organismo pro biótico de correlación simbiótica y energética” (Constantini, 2010, párr. 1).



Plant-E Compañía holandesa aprovecha la electricidad de las plantas vivas para luego poder utilizarla en cargadores de teléfonos celulares, Wi-Fi, y en más de 300 lámparas LED en algunos sitios de los países bajos” (Flores, 2015, párr. 1).



Planta lámpara “Un modelo de lámpara que produce energía limpia y auto sostenible en función de la tierra y la fotosíntesis” (Dioses, 2015, párr. 1).



Moss Biophotovoltaic. El dispositivo captura la energía Bio-Foto-Voltaica (BFV) -de ahí su nombre- que generan las plantas antes de llegar a la fotosíntesis, transformando la energía química en energía eléctrica. Para ello, usa plantas como algas, musgos, cianobacterias y otros pequeños vegetales. (Sanz, 2012, párr. 3)



E- ikaia



“Dispositivo portátil que por medio de un biocircuito capta y transforma en electricidad la energía de plantas” (iCrowdNewswire, 2016, párr. 1).

Bioo



No cuenta con ninguna certificación ni comprobación científica externa de que esto sea posible. Pero se trata de otro modelo comercializado que utiliza el metabolismo de la planta para producir energía

Soil Lamp



“Marieke Straps es quien está detrás de este invento, una lámpara que funciona aprovechando la energía del suelo. [...] Solo aprovechando el mecanismo de conductividad natural [...]” (ECO Portal, 2014, párr. 2-6).

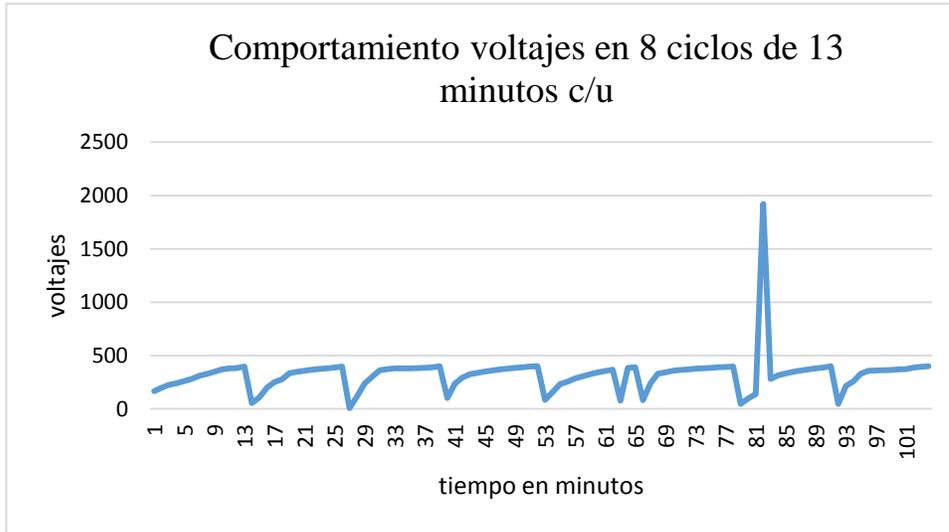
Mudwatt Kit de Ciencias de la educación que utiliza los microorganismos encontrados naturalmente en el suelo para generar electricidad



Anexo 3. Calculadora de potencia microbiana mudwatt™

<p>Cálculo de potencia: Para calcular la potencia de tu MudWatt durante el modo de parpadeo, puedes utilizar la aplicación gratuita MudWatt Explorer disponible en iTunes o Google Play, o tendrás que contar la cantidad de parpadeos que ves en un minuto e introducirla debajo de *. Nota: Esta ecuación de potencia solo es válida para MudWatts comprados después del 1 de agosto de 2014, que usa un condensador azul (10uF) en modo Blinker.</p>		
Cantidad de parpadeos por minuto:		<--Enter your value here (skip this step if you have the MudWatt Explorer App)
Potencia calculada (en microWatts)	0,0	
<p>* MUCHAS GRACIAS a la gente de Science Buddies por caracterizar la relación entre el poder y la frecuencia de parpadeo</p>		
<p>Cálculo de la población de microbios: Gracias a algunas investigaciones fantásticas realizadas en laboratorios universitarios *, ahora podemos usar el valor de potencia de tu MudWatt para estimar el número de microbios donadores de electrones activos alrededor del ánodo de tu MudWatt. Esta es una estimación basada en las tasas de respiración microbiana y las tasas de donación de electrones encontradas en experimentos de laboratorio controlados y se extrapola para adaptarse a las condiciones comunes encontradas en MudWatts. La estimación se considera precisa dentro de un factor de 2.</p>		
Su potencia de MudWatt (en microWatts):		
La corriente de tu Mudwatt (en Amperios):	0,00E+00	
La corriente de tu Mudwatt (en electrones por segundo):	0,00E+00	
Corriente promedio por microbio electrogénico activo (en electrones por segundo) *:	1,0E+06	
Corriente promedio por microbio electrogeno activo (en Amperios) *:	1,6E-13	Su potencia de MudWatt (en microWatts):
Cantidad de microbios electrogénicos activos en su MudWatt:	-	<- Este es el número estimado de microbios donantes de electrones alrededor del ánodo de tu MudWatt. ¡Estos microbios están masticando los nutrientes dentro de tu lodo, cada uno donando alrededor de un millón de electrones por segundo a tu ánodo.
<p>*References: - El-Naggar et al. <i>Electrical transport along bacterial nanowires from Shewanella oneidensis MR-1</i>. 2010 - Mclean et al. <i>Quantification of Electron Transfer Rates to a Solid Phase Electron Acceptor through the Stages of Biofilm Formation from Single Cells to Multicellular Communitie</i>. 2009</p>		
Número estimado de kilómetros (km) recorridos:	0,0	
Número estimado de millas (millas) recorridas:	0,0	
Cantidad estimada de campos de fútbol recorridos:	0,0	<- Esto se estima a partir de la población de microbios de MudWatt que se encuentra arriba.

Anexo 4. Comportamiento de voltajes en un ciclo de 13 minutos en la columna bioelectrogénica en mv. Página 102



Autopotenciales de columna bioelectrogénica en Mv

prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	prueba 6	prueba 7	prueba 8
165,3	52,4	6,2	100,4	83,6	81,3	46,5	44,9
196,9	106,7	118	234,9	154,4	237,6	96,3	215
223,9	196,5	238,2	292,8	232,9	329,1	137,4	257,7
239,6	249	300,2	323,7	255	341,6	1921	329,5
260,6	275,8	360,6	337,6	285,3	357,7	279	356,4
278,7	334,7	372,7	349,5	305,1	363,5	315,3	358,2
308,3	347	378,4	359,6	325,4	369,8	332,6	360,9
327,6	357,4	379,1	368,2	341,8	375,4	346,7	364,5
346,2	366,2	380,3	376,5	355,2	380	358,5	368
369,2	375,1	382,4	384,1	366,3	384,2	369	370,7
378	379,6	384,2	388,2	76,2	388	378,7	386,3
382,4	385,4	389,2	396,1	383,7	392,5	385,3	393,7
396,8	397,5	398,4	399,8	390,1	397,4	399,3	398,2

Anexo 5. Monitoreo de biogeobateria del 24 de junio al 20 de agosto de 2018 página 93

Index, Timestamp, Power (microWatts)		
0, 2018-06-24 15:27:28 +0000, 81	36, 2018-06-25 05:37:20 +0000, 62	72, 2018-06-28 17:16:57 +0000, 64
1, 2018-06-24 15:27:59 +0000, 75	37, 2018-06-25 15:37:28 +0000, 54	73, 2018-06-28 17:17:06 +0000, 64
2, 2018-06-24 15:28:51 +0000, 73	38, 2018-06-26 16:20:37 +0000, 56	74, 2018-06-28 17:17:18 +0000, 64
3, 2018-06-24 15:29:11 +0000, 72	39, 2018-06-26 17:43:14 +0000, 57	75, 2018-06-28 17:17:29 +0000, 66
4, 2018-06-24 15:29:34 +0000, 72	40, 2018-06-26 20:30:35 +0000, 57	76, 2018-06-28 17:17:41 +0000, 66
5, 2018-06-24 15:29:50 +0000, 71	41, 2018-06-26 20:31:19 +0000, 57	77, 2018-06-28 17:18:16 +0000, 64
6, 2018-06-24 15:42:12 +0000, 65	42, 2018-06-26 20:31:36 +0000, 57	78, 2018-06-28 18:24:15 +0000, 58
7, 2018-06-24 15:44:47 +0000, 70	43, 2018-06-26 20:31:49 +0000, 55	79, 2018-06-28 18:56:40 +0000, 59
8, 2018-06-24 16:35:04 +0000, 64	44, 2018-06-26 20:32:00 +0000, 58	80, 2018-06-28 19:43:18 +0000, 58
9, 2018-06-24 16:35:46 +0000, 123	45, 2018-06-26 20:32:11 +0000, 58	81, 2018-06-28 22:17:16 +0000, 58
10, 2018-06-24 16:36:08 +0000, 119	46, 2018-06-26 20:33:35 +0000, 60	82, 2018-06-29 03:12:57 +0000, 58
11, 2018-06-24 16:36:27 +0000, 116	47, 2018-06-26 23:50:54 +0000, 56	83, 2018-06-29 03:13:36 +0000, 57
12, 2018-06-24 16:37:01 +0000, 111	48, 2018-06-27 11:22:48 +0000, 55	84, 2018-06-29 20:10:33 +0000, 58
13, 2018-06-24 16:37:27 +0000, 109	49, 2018-06-27 11:23:13 +0000, 54	85, 2018-06-30 00:48:28 +0000, 58
14, 2018-06-24 16:38:13 +0000, 102	50, 2018-06-27 19:04:27 +0000, 9	86, 2018-06-30 18:47:17 +0000, 55
15, 2018-06-24 16:38:36 +0000, 100	51, 2018-06-27 19:04:58 +0000, 59	87, 2018-07-01 03:28:28 +0000, 54
16, 2018-06-24 16:39:05 +0000, 46	52, 2018-06-27 19:05:25 +0000, 13	88, 2018-07-01 13:18:17 +0000, 53
17, 2018-06-24 16:39:40 +0000, 92	53, 2018-06-27 19:05:42 +0000, 62	89, 2018-07-01 13:19:39 +0000, 54
18, 2018-06-24 16:40:37 +0000, 87	54, 2018-06-27 19:13:16 +0000, 29	90, 2018-07-01 21:35:46 +0000, 55
19, 2018-06-24 16:45:32 +0000, 62	55, 2018-06-27 19:13:33 +0000, 62	91, 2018-07-02 14:29:32 +0000, 54
20, 2018-06-24 16:47:52 +0000, 58	56, 2018-06-27 19:13:51 +0000, 62	92, 2018-07-02 19:04:15 +0000, 55
21, 2018-06-24 22:01:16 +0000, 37	57, 2018-06-27 19:14:11 +0000, 62	93, 2018-07-02 19:04:48 +0000, 55
22, 2018-06-24 22:36:23 +0000, 38	58, 2018-06-27 19:32:48 +0000, 59	94, 2018-07-04 14:14:36 +0000, 53
23, 2018-06-24 22:56:39 +0000, 40	59, 2018-06-27 19:38:07 +0000, 68	95, 2018-07-04 18:04:14 +0000, 56
24, 2018-06-24 23:13:54 +0000, 42	60, 2018-06-28 11:43:18 +0000, 56	96, 2018-07-05 04:14:05 +0000, 55
25, 2018-06-24 23:26:01 +0000, 46	61, 2018-06-28 16:27:40 +0000, 55	97, 2018-07-06 16:25:28 +0000, 56
26, 2018-06-24 23:39:51 +0000, 45	62, 2018-06-28 17:10:11 +0000, 57	98, 2018-07-07 05:42:59 +0000, 55
27, 2018-06-25 00:21:36 +0000, 45	63, 2018-06-28 17:11:06 +0000, 28	99, 2018-07-08 21:37:31 +0000, 58
28, 2018-06-25 00:21:59 +0000, 45	64, 2018-06-28 17:11:30 +0000, 13	100, 2018-07-08 22:56:59 +0000, 57
29, 2018-06-25 01:45:34 +0000, 49	65, 2018-06-28 17:11:59 +0000, 60	101, 2018-07-08 23:40:13 +0000, 59
30, 2018-06-25 02:15:19 +0000, 50	66, 2018-06-28 17:15:01 +0000, 61	102, 2018-07-08 23:42:47 +0000, 61
31, 2018-06-25 04:15:45 +0000, 52	67, 2018-06-28 17:15:29 +0000, 62	103, 2018-07-09 19:52:51 +0000, 57
32, 2018-06-25 05:35:14 +0000, 54	68, 2018-06-28 17:15:45 +0000, 63	104, 2018-07-12 13:36:17 +0000, 57
33, 2018-06-25 05:35:36 +0000, 56	69, 2018-06-28 17:16:01 +0000, 63	105, 2018-08-20 07:02:19 +0000, 66
34, 2018-06-25 05:35:47 +0000, 58	70, 2018-06-28 17:16:18 +0000, 63	106, 2018-08-20 23:20:42 +0000, 66

Anexo 6. Monitoreo de biogeobateria del 21 de agosto de 2018 al 28 de marzo de 2019

- 107, 2018-08-21 20:49:04 +0000, 65
- 108, 2018-10-28 16:02:01 +0000, 36
- 109, 2018-11-04 22:00:17 +0000, 34
- 110, 2018-11-10 20:46:12 +0000, 33
- 111, 2019-01-10 17:20:44 +0000, 26
- 112, 2019-01-10 17:21:08 +0000, 26
- 113, 2019-01-14 21:30:14 +0000, 23
- 114, 2019-01-22 16:38:44 +0000, 24
- 115, 2019-03-26 00:59:09 +0000, 16**

