



**PROPUESTA DE INTEGRACIÓN BIOMIMÉTICA EN LA INGENIERÍA
AMBIENTAL: CASO ESTUDIO REDUCCIÓN DE LA SALINIDAD EN
SUELOS DE CULTIVO DE ROSA (*Rosa spp.*) EN LA SABANA DE BOGOTÁ,
CUNDINAMARCA**

2002-021

Ximena Alexandra Nivia Valenzuela

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 24 de mayo de 2021

**PROPUESTA DE INTEGRACIÓN BIOMIMÉTICA EN LA INGENIERÍA
AMBIENTAL: CASO ESTUDIO REDUCCIÓN DE LA SALINIDAD EN
SUELOS DE CULTIVO DE ROSA (*Rosa spp.*) EN LA SABANA DE BOGOTÁ,
CUNDINAMARCA**

Ximena Alexandra Nivia Valenzuela

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
Bio. Esp. MSc. Liliana Figueroa Del Castillo

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad de sistemas ambientales

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2021

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedico este proyecto de grado a mi mamá, a mi hermana y a mi directora de proyecto, que cuando escucharon la idea aunque sonó un poco idealista confiaron en que podía hacerse realidad pese a las circunstancias, gracias por seguirme en cada paso y ayudarme a ser mejor, siempre.

*Todos los problemas que intentamos resolver ya han sido resueltos
por la naturaleza durante millones de años de evolución*
-Janine M. Benyus

Agradecimientos

Agradezco a las personas que me acompañaron durante el proceso de este proyecto de grado por estar ahí, por creer que es posible hacer cosas nuevas en un mundo donde creemos que ya todo está establecido. Doy gracias especiales a mis padres, a mi hermana, a la docente que me acompañó durante año y medio en todo este proceso y a mis amigos quienes siempre estuvieron ahí para apoyarme, alentarme siempre a seguir y no desfallecer.

Tabla de Contenido

1	Resumen	13
2	Abstract	13
3	Introducción	14
4	Planteamiento del problema	17
5	Justificación	21
6	Objetivos	24
7	Marco de referencia	25
7.1	Antecedentes	25
7.2	Marco teórico conceptual	30
7.2.1	Biomímesis.....	30
7.2.2	El suelo.....	31
7.2.3	Fisiología vegetal	40
7.3	Marco normativo	44
7.4	Marco geográfico	45
7.5	Marco institucional.....	48
8	Metodología	49
8.1	Método:	50
8.2	Enfoque:	50
8.3	Alcance:.....	50
8.4	Técnica-Instrumento:.....	51
9	Resultados	57
9.1	Obj. Esp. 1: Seleccionar los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo.....	58
9.2	Obj. Esp. 2: Adaptar el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos en cultivo de rosa bajo cubierta de invernadero.	59
9.3	Obj. Esp. 3: Correlacionar el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisorio de recuperación sostenible.....	64
10	Análisis y discusión de resultados	70
11	Conclusiones	74
12	Recomendaciones	75
13	Referencias bibliográficas	76

14 Anexos:	81
14.1 Anexo 1. Mapa de Colombia zonificado por susceptibilidad a degradación por salinización	81
14.2 Anexo 2. Zonas susceptibles a degradación por salinización en Colombia	82
14.3 Anexo 3. Plan de trabajo-Cronograma	82
14.4 Anexo 4. Presupuesto	83

Listado de Tablas

Tabla 1 Grados de Salinidad CAR.....	39
Tabla 2 Matriz de variables.....	52
Tabla 3 Matriz metodológica	53
Tabla 4 Indicadores de salinidad iniciales para las muestras de suelo.....	59
Tabla 5 Análisis de laboratorio muestras de suelos	64
Tabla 6 Resultados bitácoras por montaje	65
Tabla 7 Correlación de Pearson con nivel de confianza del 95%.....	69

Listado de Figuras

Figura 1. Contextualización del problema Elaboración propia	19
Figura 2. Contextualización Marco teórico-conceptual Elaboración propia	30
Figura 3. Acumulación de sales en el suelo. Fuente (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015)	34
Figura 4. Acumulación de sales en el suelo con exceso de riego. Fuente: (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015).....	35
Figura 5. Acumulación de sales en suelo con buen drenaje. Fuente (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015).....	36
Figura 6. Resumen de la teoría. (Hernández Gil, 2002).	40
Figura 7. Mapa ubicación de la Sabana de Bogotá. (Gobernación de Cundinamarca, 2006)	45
Figura 8. Ubicación de municipios zona de influencia. Somos Cundinamarca (2012).....	46
Figura 9. Ministerio de Ambiente.....	48
Figura 10. Corporación autónoma Regional.....	48
Figura 11. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.	48
Figura 12. Instituto geográfico Agustín Codazzi.....	49
Figura 13. Universidad El Bosque.....	49
Figura 14. Secuencia metodológica de investigación Elaboración propia	49
Figura 15. Plan de trabajo. Elaboración propia.....	55
Figura 16. Proceso montajes por triplicado Elaboración propia.....	56
Figura 17. Proceso desmontaje y análisis de muestras Elaboración propia.....	57
Figura 18. Resultados ajuste protocolo Fase 1 y 2.....	60

Figura 19. Resultados ajuste protocolo Fase 3.....	61
Figura 20. Cristales de ferrocianuro de potasio y sal.....	61
Figura 21. Resultados ajuste protocolo Fase 4.....	62
Figura 22. Prototipo del método biomimético de una planta vascular. Comparativo montaje vs. planta vascular. Elaboración propia.....	63
Figura 23. Tratamientos con ferrocianuro aplicados a la muestra de Sopo.	63
Figura 24. Demostración gráfica disminución del agua en días por montaje.	66
Figura 25. Demostración gráfica sales extraídas por montaje.	67
Figura 26. Índice de Confianza de montajes.....	68
Figura 27. Comparación de montajes representativos.	68
Figura 26. Mapa de susceptibilidad a la degradación de suelos por salinización, E:1:100.000. IDEAM, CAR, &U.D.C.A, (2017)	81
Figura 27. Zonas susceptibles a la degradación de suelos por salinización por diversos factores. Fuente IDEAM, CAR, & UDCA, (2017)	82

1 Resumen

Esta monografía busca tomar a la biomimesis como una propuesta de integración a la ingeniería ambiental a modo alternativa innovadora que permita la recuperación de suelos salinos en la Sabana de Bogotá, enfocándose en tres cultivos de rosa bajo cubierta de invernadero ubicados en los municipios de Sopó, Tenjo y Tocancipá (Cundinamarca). Este trabajo de grado se fundamenta en el artículo “*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*” autoría de Mathew J.B. Swallow y Gwen O'Sullivan (2019) donde se hace uso de los principios de evapotranspiración para remediar el suelo. La presente propuesta se ejecutó a partir del ajuste y generación del prototipo biomimético de una planta vascular con cáscara de coco como un agente absorbente, evaluando dos muestras de suelo salino y una muestra como blanco, estableciendo la diferencia entre los indicadores de salinidad durante 30 días de tratamiento, se realizó el análisis estadístico con prueba de Tukey y R^2 para verificar los resultados obtenidos logrando el porcentaje reducción entre los valores: pH se mantuvo sobre 6, conductividad eléctrica (CE) disminuyó 60% entre las muestras de Sopo y Tenjo, sin embargo para los tratamientos aplicados a la muestra de Tocancipá se obtuvieron resultados opuestos. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumentó 53% entre las 3 muestras, el % de saturación de agua aumentó entre el 15 al 20%, los iones disminuyeron entre 73 al 93% para sodio, 57 al 97% para calcio, y de 43 a 93% para magnesio entre las tres diferentes muestras. La relación de absorción de sodio (RAS) disminuyó para todas las muestras entre 14 y 68% excepto para el tratamiento sin ferrocianuro en la muestra de Tocancipá que aumentó 29%; y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) disminuyó 89, 95 y 89% para las muestras de Sopo, Tenjo y Tocancipá respectivamente, concluyendo así que este tipo de procesos genera una alternativa no solo funcional sino eficiente en suelos salinos con diferentes texturas.

Palabras clave: *Biomimesis, capilaridad, suelo, salinización, sostenibilidad.*

2 Abstract

This monograph seeks to take biomimicry as a proposal for the integration of environmental engineering as an innovative alternative that allows the recovery of saline soils in the Sabana de Bogotá, focusing on three rose crops under greenhouse cover located in the municipalities of Sopó, Tenjo and Tocancipá (Cundinamarca). This degree work is based on the article "Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation" authored by Mathew J.B. Swallow and Gwen O'Sullivan (2019) where the principles of evapotranspiration are used to remedy the soil. The present proposal was executed from the adjustment and generation of the biomimetic prototype of a vascular plant with coconut shell as an absorbing agent, evaluating two samples of saline soil and one sample as a blank, establishing the difference between the salinity indicators for 30 days of treatment, the statistical analysis was performed with the Tukey and R^2 test to verify the results obtained, achieving the percentage reduction between the values: pH remained above 6, electrical conductivity (CE) decreased 60% between the Sopo and Tenjo samples, without however, for the treatments applied to the Tocancipá sample, opposite results were obtained. The cation exchange capacity (CIC) increased 53% between the 3 samples, the % of water saturation increased between 15 to 20%, the ions decreased between 73 to 93% for sodium, 57 to 97% for calcium, and from 43 to 93% for magnesium between the three different samples. The sodium absorption ratio (RAS) decreased for all samples between 14 and 68% except for the treatment without ferrocyanide in the Tocancipá sample, which increased 29%; and the percentage of exchangeable sodium (PSI) decreased 89, 95 and 89% for the Sopo, Tenjo and Tocancipá samples respectively, thus concluding that this type of process generates an alternative that is not only functional but efficient in saline soils with different textures.

Keywords: *Biomimicry, capillarity, soil, salinization, sustainability.*

3 Introducción

Las actividades antrópicas que se llevan a cabo en la vida diaria ejercen presión sobre los servicios ecosistémicos que ofrece el suelo, desencadenando entonces procesos de degradación que amenazan el equilibrio ecológico, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible por el que propenden diferentes países a nivel mundial (IDEAM et al., 2017). Se sabe que el hombre solo utiliza un pequeño porcentaje de la biodiversidad existente para asegurar los alimentos, sin embargo, no solo genera las limitaciones en especies, con una estrecha brecha genética aumentando así la vulnerabilidad del sistema agrícola y por ende la seguridad alimentaria, el no tener suelos productivos, representan un mayor problema para asegurar la alimentación a nivel mundial.

Por lo anterior se hace necesario definir de dónde surgen estos suelos, que se originan de forma química natural o inducida por el hombre, en donde ocurre “aumento, ganancia o acumulación de sales solubles en el suelo, lo cual tiene implicaciones negativas sobre los servicios y las funciones ecosistémicas y ambientales que ofrecen los suelos” (SIAC, 2015).

La ingeniería, haciendo uso de teorías, estudios matemáticos y ciencias naturales propende por el mejoramiento de la calidad de vida humana integrando, desde un enfoque holístico los tres pilares de la sostenibilidad: ambiente, economía y sociedad (Global Engitech, 2014). En este sentido, los estudios en ciencias naturales han demostrado que la misma naturaleza posee altas capacidades para gestionar los recursos, por tanto, se ha tomado este comportamiento para adaptarlo a solucionar problemas antrópicos; esta técnica se ha denominado biomimesis (López-Portillo, 2010; Moreno De Luca et al., 2012).

De acuerdo con Gómez-Cruz & Maldonado (2011), el reconocimiento de la ingeniería como una ciencia integradora de teorías y conocimiento de diferentes ramas del saber con el fin de utilizar y transformar tanto la materia como las fuentes de energía para beneficio del hombre, genera una posible segmentación en ingeniería no convencional, ingeniería de sistemas complejos e ingeniería bioinspirada. En efecto, la necesidad del hombre de comprender, explicar y construir sistemas y soluciones ha generado que las primeras dos clasificaciones mencionadas se conviertan en soluciones que funcionan lejos del equilibrio, a pesar de su intento por auto organizarse y adaptarse al cambio, siguen siendo soluciones problema, puesto que no se comprenden en su totalidad, sino que contienen incertidumbre.

Sin embargo, aunque el énfasis hacia los sistemas complejos plantea una infinidad de atributos y posibilidades para la ingeniería como escalabilidad, flexibilidad, adaptabilidad, transformación, auto organización, resiliencia, durabilidad y otros, la ingeniería de estos sistemas es un nuevo paradigma ingenieril. Por esto, el paso de la ingeniería clásica hacia los sistemas complejos, requirió la dificultad resultante de sistemas diseñados y construidos bajo los mejores conocimientos reduccionistas de la ciencia y la física. También, la ingeniería comprendió la restricción de sistemas que aunque exhibían multiplicidad, sus bases no debían ser necesariamente complejas. De aquí, surge entonces la simulación y síntesis de los sistemas naturales que se transforman en elementos indispensables para la comprensión y explicación de los sistemas, base de la ingeniería bio inspirada (Gómez-Cruz & Maldonado, 2011).

Ahora bien, aunque la ingeniería bio-inspirada se conoce como “vida artificial” ya que estudia la vida e intenta sintetizarla, se categoriza en 3 grupos según el rol que ocupan en la ciencia-ingeniería. El primero es aquel que comprende y explica los fenómenos biológicos que aún no se destacan en la ingeniería; el segundo es un grupo mixto que surge del estudio de un fenómeno biológico y consecuentemente las soluciones ingenieriles y por último, el tercer grupo es aquel que no pretende comprender un fenómeno biológico particular, sino resolver un problema de ingeniería (Gómez-Cruz & Maldonado, 2011).

Es en el segundo grupo de la bio-inspiración donde entra la biomiméesis, ya que es una ciencia y método que comprende cómo funciona la vida y lo que hace la naturaleza, y dónde encaja el hombre en el sistema, creando productos, procesos, políticas y formas de vida innovadores que resuelven los problemas cotidianos de manera sostenible, haciendo uso de la sabiduría de la naturaleza en beneficio del hombre y del planeta. A pesar de la entropía de los sistemas naturales y los problemas a los que se deben responder desde la ingeniería ambiental con propuestas válidas desde la perspectiva económica, ecológica y social, la biomiméesis se presenta como una solución asequible y válida para enfrentar los diferentes desafíos que trae el día a día para el ingeniero (Biomimicry Institute, 2018)

La presente monografía busca proponer una alternativa no convencional en la recuperación de suelos salinos, a través de la imitación del proceso de capilaridad de las plantas vasculares como fuente de inspiración biomimética, basada en el artículo de investigación “*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*” donde los autores Swallow & O’Sullivan (2019) utilizaron la evapotranspiración para desplazar el agua salina presente en el suelo hasta la superficie donde emerge con ferrocianuros visibles, debido a que al utilizar el ferrocianuro de potasio (compuesto inorgánico) como inhibidor se logró precipitar las sales de suelo. Los resultados de este ensayo evidenciaron la eficiencia del proceso de simulación del fenómeno capilar de las plantas vasculares, reduciendo los niveles de salinidad, dando lugar a la presentación de soluciones que permitan disminuir o erradicar las altas concentraciones de sal encontradas en el suelo a nivel global.

El impacto de la salinización del suelo afecta cerca de 2.000 hectáreas de tierras irrigables por día, afectando principalmente zonas secas en 75 países a nivel mundial (FAO, 2013), lo que convierte esta problemática en un fenómeno que aqueja a la mayor parte del planeta, afectando de manera drástica la seguridad alimentaria de la población. Sin embargo, este problema demuestra el exceso de sales presentes en el suelo tales como el sodio, esta sal se infiltra causando inestabilidad en los parámetros fisicoquímicos del recurso hídrico presente en el suelo, recurso que es nuevamente aprovechado en la productividad agrícola, haciendo que el ciclo de las sales sea continuo (Qadir, Ghafoor & Murtaza, 2000).

Las actividades antrópicas que se llevan a cabo en la vida diaria ejercen presión sobre los servicios ecosistémicos que ofrece el suelo, desencadenando entonces procesos de degradación que amenazan el equilibrio ecológico, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible por el que propenden diferentes países a nivel mundial (IDEAM et al., 2017). Se sabe que el hombre solo utiliza un pequeño porcentaje de la biodiversidad existente para asegurar los alimentos, sin embargo, no solo generar las limitaciones en especies, con una estrecha brecha genética aumentando así la vulnerabilidad del sistema agrícola y por ende la seguridad alimentaria, el no tener suelos productivos, representan un mayor problema para asegurar la alimentación a nivel mundial.

Por lo anteriormente expuesto, fue de interés desarrollar el presente trabajo centrado en los suelos salinos más específicamente en la Sabana de Bogotá debido a que para 2016 el 45% de los suelos en Colombia presentaron susceptibilidad a la degradación derivada de la salinización (IDEAM et al., 2017), adicional a esto se tuvo en cuenta que según la FAO (2015), en uno de estudios desarrollados en el Año Internacional de los Suelos, las tres mayores amenazas para los suelos en América Latina y el Caribe son la erosión, la pérdida de carbono orgánico y la salinización, dejando en claro que existen suelos de carácter natural procedentes de erupciones de cenizas, aguas con minerales salinos, zonas con inundaciones y suelos en climas secos; y de carácter antrópico que se generan por actividades agropecuarias excesivas e inapropiadas, actividades turísticas, minería inadecuada y la deforestación. Estos factores antrópicos generan la salinidad en el suelo y su cambio en los parámetros fisicoquímicos causando un impacto en el ambiente que debe ser recuperado (IDEAM et al., 2017).

En Colombia, las problemáticas arraigadas a la salinidad en los suelos se ven representados en un 12,3 % del territorio nacional, de acuerdo al Protocolo de Salinización (IDEAM et al., 2017), el 12 % corresponde al uso inadecuado de las áreas protegidas, el 5% presente está afectado por fenómenos de salinización, con lo que se pierde la biodiversidad, los servicios ambientales de los suelos, la captura de CO₂ y regulación del clima. Por otro lado, el 15% de suelos del país representado en las clases II, III y IV (los mejores suelos para el desarrollo agropecuario); el 10% de este porcentaje está siendo degradado por salinización. Esto no sólo representa una afectación a nivel ecológico, sino que trae consigo un sinnúmero de problemáticas que afectan al ámbito social y económico, cabe aclarar que esta salinización del suelo, genera la reducción de la diversidad de especies, el estrés osmótico en plantas y causa el aumento de la erosión del suelo por la pérdida de la vegetación de las zonas afectadas como se puede observar en el *Anexo 1*, donde se visualiza la Sabana de Bogotá como un punto de alto susceptibilidad a la degradación por salinización (Auchmoody & Walters, 1988).

Debido a lo anterior, la FAO considera necesario que los gobiernos, legisladores y responsables de las políticas, potencien las organizaciones de protección fitosanitaria y otras, además de proporcionar recursos humanos y financieros, también deben invertir en la investigación y actividades de divulgación relacionadas con salinidad (FAO, 2020). Pues este tipo de tecnología innovadora permitirá hacer los sistemas sostenibles, sin explotar los recursos naturales, asegurando el segundo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) “Hambre Cero”, pues al recuperar estos suelos y hacerlos nuevamente fértiles para agricultura se asegura a la población presente como futura el “terminar con todas las formas de hambre y desnutrición, velando por una alimentación suficiente y nutritiva” (PNUD, 2020b).

Cabe resaltar el ODS 12 “Producción y Desarrollo Sustentable”, integrado a los ODS 13 “acción por el clima” y “vida de ecosistemas terrestres”, que propenden por reducir la huella ecológica a través del cambio metodológico de producción y consumo de bienes y recursos naturales, la ONU resalta que la agricultura es el principal consumidor de agua, puesto que el riego representa un 70% de agua dulce disponible para consumo, pero también representa recursos económicos y medios de desarrollo importantes en diferentes países, en especial para Colombia, por lo anterior se requiere la gestión eficiente de todos los recursos que son compartidos, teniendo en cuenta que tanto la industria como el consumidor, así como sus intermediarios deben reducir los residuos así como hacer uso de la economía circular que permite la sostenibilidad de la producción, teniendo en cuenta la contribución al cambio climático que tienen como consecuencia la salinidad de los suelos salinos con origen antrópico (PNUD, 2020a).

La biomimesis ofrece un mecanismo de aprendizaje sobre los procesos naturales dejando a disposición del ser humano su implementación en sus sistemas de producción, a su vez esta se puede relacionar con la economía circular puesto que, la segunda aunque igual toma inspiración en la naturaleza, se enfoca en la utilización de elementos biodegradables, el concepto inicial de las 3 R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) como pilares de su implementación (Balboa C. & Domínguez Somonte, 2014).

En consecuencia, el presente estudio evaluó la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa bajo cubierta de invernadero en la Sabana de Bogotá (Tenjo-Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar y evapotranspiración que llevan a cabo las plantas vasculares como alternativa de recuperación de suelos, esta investigación se llevó a cabo teniendo como base fundamental los procesos de la naturaleza, desarrollando un enfoque multimodal que permitió tener un alcance de investigación exploratorio; se dividió en 4 fases las cuales fueron: investigación, recolección de muestras, experimental y de evaluación de resultados, obteniendo entonces los indicadores edafológicos de salinidad y la variación antes y después del tratamiento aplicado por 30 días, la adaptación del prototipo propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) con cáscara de coco como material absorbente y por último se correlacionó el prototipo biomimético con los indicadores de salinidad, encontrando que al ejecutar el tratamiento es posible recuperar el suelo salino teniendo en cuenta la variación que se obtuvo en los indicadores seleccionados, alcanzando las bases que impulsan la extrapolación esta propuesta a condiciones de campo para preservar los servicios ecosistémicos que provee este recurso.

Lo anterior, constituye un aporte al estudio de diferentes estrategias encaminadas a optimizar el recurso suelo útiles para la solución de la salinidad en suelos de cultivos de flores desde la biomimesis para la sabana de Bogotá, teniendo en cuenta que la ingeniería ambiental no solo se preocupa por mejorar la calidad de vida del hombre, sino por mantener el equilibrio entre los pilares de la sostenibilidad ambiente, economía y sociedad, a través de los objetivos de desarrollo sostenible que se desean alcanzar no solo a nivel local sino global.

4 Planteamiento del problema

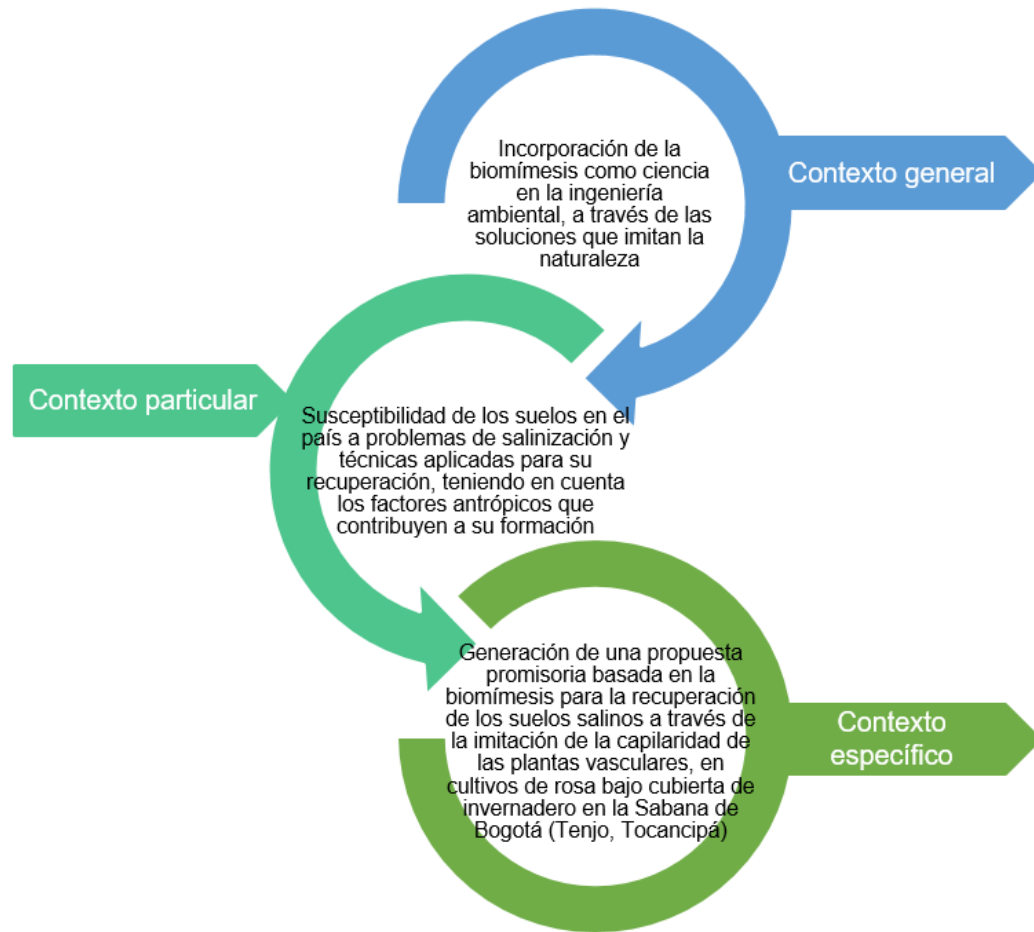
A lo largo de la historia se han realizado observaciones sobre la naturaleza y su dinámica, con el fin de brindar alternativas innovadoras para mejorar la calidad de vida del ser humano, este modelo de pensamiento ha estado vigente desde tiempos inmemoriales y ha sido tenido en cuenta por grandes pensadores con proyección al futuro, uno de tantos ejemplos que existen es el de Leonardo Da Vinci, quien inspirado en la observación de las técnicas de vuelo de aves e insectos en cuanto a sus giros, velocidad de caza y dirección, pudo construir un experimento revolucionario en su época como fue la máquina voladora, experimento que fracasó sin embargo le permitió escribir dos tratados uno en 1486 y otro en 1515, donde reunió información del planeo y despegue de los pájaros acercándose a los diseños actuales de las alas de los aviones, muchos de las anotaciones y dibujos están también registrados en el libro traducido del italiano *Códice sobre el vuelo de los pájaros* 1505. Otro de los ejemplos que se pueden mencionar es el diseño del coche blindado basado en la estructura y forma del caparazón de la tortuga, pues estaba construido en madera y reforzado con placas de metal, además de la forma inclinada para amortiguar los impactos y proteger a los soldados en su interior (López-Portillo, 2010).

De acuerdo con lo anterior y sumado al reciente auge de la generación de ideas de soluciones basadas en la naturaleza, cobra especial importancia la propuesta realizada en el presente proyecto de investigación que es el de integrar a la biomimética en la ingeniería ambiental, tal es así que ésta disciplina ha sido tomada en cuenta como uno de los modelos de pensamiento de la economía circular por lo tanto es relevante implementarla en los sistemas naturales, que aunque ya estudiados y con diversas alternativas de solución, a veces no hay logros acertados que respondan a las necesidades ambientales, económicas y sociales del sistema, además es probable y como ocurre en muchos casos, no se conoce a profundidad por lo tanto no se está aprovechando al máximo, siendo una alternativa viable que ofrece una mejor calidad de vida del ser humano.

Una de las problemáticas ambientales que aquejan al mundo actual y con grandes repercusiones socioeconómicas, es la salinidad de los suelos, el documento titulado *Estado del recurso suelo* de la (FAO, 2016) reporta que el 33 por ciento de la tierra se encuentra de moderada a altamente degradada debido a las amenazas del suelo como son la erosión, salinización, compactación, acidificación y contaminación química de los suelos, en cuanto a Colombia, el IDEAM en asocio con la CAR y la UDCA en el año 2017, divulgó el mapa de zonas susceptibles a la degradación de suelos por salinización por diversos factores (Anexo 2), la susceptibilidad de los suelos se refiere a la vulnerabilidad que tienen los mismos por factor clima, paisaje, relieve, tipo y uso del suelo de aumentar la concentración de sales solubles, de acuerdo con los resultados obtenidos por las entidades en mención, este fenómeno alcanza la cifra de 14 millones de hectáreas (12,3%) del área continental e insular afectadas, donde el departamento de Cundinamarca ocupó el 5to lugar en el país con mayor porcentaje de su extensión en suelos productivos agrícolas del 23,7%.

Es importante resaltar que los valores obtenidos son producto de condiciones naturales y la mayoría corresponden a actividades realizadas por el hombre que pueden ser de alto impacto o modifican las condiciones naturales, es decir el manejo antrópico sobre el recurso suelo ha ocasionado el aumento de salinidad, tal es el caso de los cultivos de flores, en especial rosa en la sabana de Bogotá, específicamente los ubicados en Tenjo y Tocancipá, ya que la siembra de la misma especie repetitivamente, junto con la acumulación de sales provenientes del agua de riego y los fertilizantes, ha ocasionado aumento en los valores de salinidad siendo una limitante para la obtención del producto y de calidad del mismo, así como el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

Para tomar los correctivos frente a la problemática de los suelos salinos se han realizado investigaciones desde la ciencia, con propósitos de remediación de suelo, sin embargo, no se ha puesto en marcha una investigación que imite los procesos de la naturaleza para dar una solución eficiente a una de las amenazas del suelo como es la salinidad de los suelos en los cultivos de flores bajo cubierta de invernadero en la Sabana de Bogotá, es así como el artículo de Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) y titulado "*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*" es la base del presente proyecto de investigación, debido a que se ajustó el diseño biomimético de capilaridad de las plantas vasculares a condiciones experimentales y controladas para evaluar la simulación biomimética en la reducción de sales, el proceso de capilaridad y ósmosis de las plantas que trata el artículo fue encaminado como principio de innovación para ser desarrollado en los suelos de estudio, tomando en cuenta 3 contextos (*figura 1*) en que se desarrolló el planteamiento de la pregunta problema *¿Por qué integrar la biomimesis como alternativa promisoría en la recuperación sostenible de los suelos?*



*Figura 1. Contextualización del problema
Elaboración propia*

Basado en los tres contextos del problema, general, particular y específico se pueden identificar los beneficios que trae consigo la biomimesis no solo como disciplina que imita los procesos de la naturaleza, sino como innovación tecnológica y científica, la presente propuesta es un estudio pionero en el país, siendo un primer paso hacia el avance exploratorio en este ámbito que tiene como meta desde la ingeniería ambiental dar a conocer herramientas de conocimiento y alternativas de recuperación de suelos, las cuales son escasas en Colombia y que permitan generar propuestas sostenibles para emprender acciones reales, holísticas, toma de decisiones sostenibles, gestión ambiental integral, y participación social, propendiendo por la prevención, control, restauración y rehabilitación de suelos, que benefician la calidad del ser humano y su entorno, y para este caso al sector floricultor el cual es uno de los más importantes para la economía del país por los altos índices que representa a nivel de exportaciones y empleo.

A lo largo de la historia se ha observado en la naturaleza la perfección para brindar alternativas innovadoras a los problemas que enfrenta la sociedad, a partir del análisis y simulación de los sistemas, procesos y modelos que esta ofrece con el fin de mejorar la calidad de vida del ser humano

propendiendo por aminorar la entropía del sistema que ha desarrollado el hombre. Esta tecnología no es nueva, al contrario, es muy antigua, acogida por grandes pensadores que veían hacia el futuro y se inspiraban en la observación de la naturaleza para innovar, uno de los tantos ejemplos fue la construcción de la máquina voladora por Leonardo DaVinci inspirado en las observación del vuelo de las aves, estas anotaciones permitieron concluir la forma de vuelo según el ave, los giros, velocidad de caza y la dirección, registradas en el libro titulado “Codice sul volo e sugli uccelli” (Códice sobre el vuelo de los pájaros) dónde estudiaba las técnicas de vuelo junto con dibujos de los mismos, este libro lo escribió en 1505. Pero este no fue el único diseño de DaVinci, también diseñó el coche blindado fundamentándose en el caparazón de la tortuga, pues estaba construido en madera y reforzado con placas de metal, además de la forma inclinada para amortiguar los impactos y proteger a los soldados en su interior, (López, 2010), con lo que se permite considerar que la tecnología de la naturaleza no se está aprovechando al máximo, pues conocerla a fondo puede brindar mejor calidad económica, ambiental y de vida.

El problema a enfrentar es el desconocimiento de cómo implementar esta ciencia innovadora en los sistemas naturales, que aunque ya estudiados y con diversas alternativas de solución, no logran aún acertar a las necesidades ambientales, económicas y sociales del sistema. Además, estos están basados en la naturaleza y las adaptaciones evolutivas de la misma, sin embargo, no se reconoce como biomímesis, pues no es nuevo diseño, sino es la aplicación de la naturaleza misma. Una de las problemáticas ambientales que aquejan el mundo actual con repercusiones sociales y económicas es la salinidad de los suelos, donde ya se han realizado investigaciones desde la ciencia, sin embargo, no se ha puesto en marcha una investigación que imite los procesos de la naturaleza para dar una solución eficaz y eficiente al problema, es por ello que surge la pregunta ***¿Por qué integrar la biomímesis a las alternativas de recuperación del suelo, a modo de alternativa promisorio de recuperación sostenible?***

En el informe “Estado mundial del recurso suelo” elaborado por la FAO en 2015, se estima que “la mayor parte de los recursos mundiales de suelos se encuentran en condición mala o muy mala y que las condiciones están empeorando en muchos más casos de los que están mejorando. En particular, el 33 por ciento de la tierra se encuentra de moderada a altamente degradada debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación y la contaminación química de los suelos”. Por ello, con el objetivo de monitorear los suelos en Colombia, el IDEAM presentó el mapa de suelos degradados en el país por salinización, encontrando 14 millones de hectáreas (12,3%) del área continental e insular afectadas. Los departamentos con mayor porcentaje de su extensión con suelos productivos agrícolas son Atlántico (51,05%), Sucre (45,5%), Magdalena (43,03%), Quindío (28,3%), Cundinamarca (23,7%), Bolívar (20,7%) y Antioquia (20,3%) (IDEAM et al., 2017)

“La susceptibilidad de los suelos (vulnerabilidad por factores ambientales o antrópicos) a la degradación por salinización es la capacidad y/o propensión de los suelos a aumentar la concentración de sales solubles tanto por condiciones intrínsecas como por agentes o factores externos como la variabilidad y el cambio climático; biofísicos como los materiales parentales de los suelos, el relieve y las coberturas de la tierra y/o antrópicos como el uso y el manejo” (SIAC, 2015) (ver Anexo 2).

Con el mapa de susceptibilidad de suelos a la salinidad, aquellos con valor alto corresponden a aquellos donde las condiciones naturales y antrópicas generan las condiciones para que los procesos de salinización ocurran de forma acelerada, especialmente si estas actividades realizadas por el hombre

son de alto impacto o modifican las condiciones naturales. Se observa entonces, que las zonas con este nivel de susceptibilidad se localizan principalmente en la región Caribe, algunos valles interandinos y algunos altiplanos de la región Andina (CAR, 2015). Es por ello que se hace necesario recuperar los suelos que presentan este tipo de degradación, en este caso los encontrados en Cundinamarca, más específicamente en cultivos de rosa ubicados en Tenjo y Tocancipá, ya que la siembra de la misma especie repetitivamente, junto con la acumulación de sales provenientes del agua de riego y los fertilizantes, se genera exceso de sales y por ende pérdida de fertilidad; por tanto se propone un método de remediación pionero en el país, que a partir de la simulación biomimética del proceso de capilaridad llevado a cabo por las plantas vasculares.

Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario establecer los principales indicadores de salinidad del suelo y la importancia que tiene cada uno de ellos en el proyecto de investigación, puesto que estos son “atributos edáficos sensibles al manejo y a las condiciones edafoclimáticas, entre otras características, que permiten valorar su estado” (García Y. et al., 2012). Seguido a esto, se ajustó el diseño biomimético de capilaridad de las plantas vasculares basado en la propuesta de Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) a las condiciones experimentales, permitiendo así evaluar la simulación biomimética en la reducción de sales, identificando los beneficios que trae consigo esta innovación tecnológica y científica, puesto que actualmente se carece de estudios de este tipo en Colombia, siendo este proyecto un primer paso hacia el avance exploratorio en este ámbito aportando a las estrategias de investigación y preservación, restauración y uso sostenible del *Protocolo para la identificación y evaluación de degradación de suelos por salinización*, comenzando por el estudio de los suelos salinos derivados de la producción de rosa, teniendo en cuenta que el sector floricultor es uno de los más importantes para la economía del país por lo que representa a nivel de exportaciones y empleo, teniendo en cuenta que estos proyectos desde la ingeniería ambiental conlleven hacia la toma de decisiones, gestión ambiental integral, generación de conocimiento y educación y participación social, propendiendo por la prevención, control, restauración y rehabilitación de suelos.

5 Justificación

Las actividades antrópicas han acelerado el deterioro natural de los ecosistemas, es por ello que desde una visión ingenieril se han desarrollado mecanismos para desacelerar el cambio climático, es entonces cuando surge la idea de biomimesis, práctica que aprende e imita las estrategias que se encuentran en la naturaleza para resolver los desafíos del diseño humano (Benyus & Garcia Leal, 1997); a su vez, esta técnica se relaciona de manera directa con la economía circular sobre la cual se encamina el mundo una vez fue aprobada la agenda 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Concretamente, el presente trabajo pretende dar una aproximación al cumplimiento de los objetivos 2 “Hambre Cero” al adaptar una metodología para el tratamiento de suelos con elevada salinidad para que estos puedan tener un mayor rango de uso en la agricultura; y el objetivo 15 “ Vida de Ecosistemas Terrestres” puesto que al mismo tiempo en que se desalinizan los suelos se abre paso a una variedad de nuevos microorganismos los cuales permitirán mejorar las características fisicoquímicas de los mismos.

Diversos autores han definido al ser humano actual como *Humus economicus*, haciendo énfasis en la importancia que se le ha dado al dinero sin tener en cuenta que en realidad el sistema económico hace parte del sistema ambiental y no al revés (Tamayo Orbegozo & Vargas, 2020), en este sentido, las investigaciones para mejorar problemáticas como temperaturas internas en viviendas y edificios, procesos de tratamiento de aguas, producción de energía y otros se han volcado a analizar cómo la naturaleza administra dichos componentes, dando como resultado nuevos sistemas de calefacción y enfriamiento en edificaciones, nuevos materiales de construcción, productos con sistemas de degradación acelerada y sin producir efectos nocivos para el ambiente, dando paso así a la economía circular, la cual se enfoca en mantener un elemento dentro de la cadena productiva por el mayor tiempo posible de tal modo que los riesgos para el ambiente sean los mínimos (Cerdá & Khalilova, 2016).

Si bien este proyecto se desarrolla con suelos provenientes de plantaciones florales, específicamente rosas, propone una alternativa innovadora para la reducción de salinidad en los suelos, a partir de la simulación biomimética del proceso capilar de las de plantas vasculares, presente una visión de aplicabilidad más amplia hacia los suelos salinos o con susceptibilidad de salinidad en el país.

Ahora bien, teniendo en cuenta la transversalidad de la ingeniería ambiental se justifica a continuación desde los pilares de la sostenibilidad la presente investigación:

Ambiental: Desde la perspectiva netamente ambiental, la implementación de tecnologías que se adapten a la naturaleza trae consigo beneficios para la resiliencia de los impactos antrópicos dentro del ecosistema. Por eso, el problema en este caso a tratar está dado por la afectación de la salinidad en las propiedades fisicoquímicas y biológicas propias de cada tipo de suelo, determinados a su vez por los indicadores de calidad del suelo, teniendo en cuenta que los suelos idóneos para cultivo de rosa son aquellos que cuentan con buen drenaje, sin exceso de arena, fértil, fresco y medianamente compactos. Adicionalmente las sales pueden tener efectos tóxicos, antagónicos, osmóticos y fisiológicos en la rosa (Rosas S., 2008).

En adición, por los flujos e interacciones dentro del sistema ambiental, se conoce que la contaminación y degradación del componente suelo, deriva en la afectación a los componentes agua, atmósfera, flora y fauna, y hombre, por lo que los suelos con condiciones de salinización generan a su vez más gases de efecto invernadero y reflejan más radiación solar (Drechsel, y otros, 2014).

Económico: Siguiendo el contexto ambiental, desde la perspectiva económica la salinidad de los suelos representa pérdidas, pues en las áreas agrícolas con uso de riego, los procesos de salinización del suelo impiden el crecimiento normal de las plantas y por ende disminuye la productividad de los cultivos. Según la FAO (2013), a nivel mundial las tierras de regadío cubren más de 310 Ha. de las cuales el 20% poseen problemas de salinidad, lo que representa 62 millones de Ha. aproximadamente. En 2013 se estimó un costo ajustado por inflación de la degradación del suelo por USD 411 (dólares) por Ha, con un estimado de pérdidas económicas mundiales de USD 27,3 mil millones por año. Adicionalmente es conocido que a diario se pierden 2.000 Ha, de tierras irrigables en el mundo debido a la salinización (IDEAM; CAR; UDCA, 2017)

La recuperación de suelos afectados por salinidad, requieren la instalación de sistemas de drenaje y prácticas de lavado inicial de sales, por lo que se deben tener en cuenta factores característicos según el suelo a tratar, sin embargo, por revisión documental, en 1990 se estimó que para un suelo cuya

conductividad eléctrica (C.E) era de 15 dS/m se requerían de 10.000 m³/Ha de agua de percolación, es decir entre 11.000 y 14.000 m³/Ha de agua de riego, por lo que el costo solo del lavado del suelo es muy elevado, adicionalmente se recomienda la implementación de cultivos con alta resistencia a la salinidad después de este lavado, por lo que se requiere no solo el cultivo, sino además la rotación del mismo, por lo que los costos aumentan (Zerki et al., 1990).

Por el contrario, esta propuesta biomimética de recuperación del suelo basada en los procesos fisiológicos de las plantas vasculares, conlleva a la disminución del consumo de agua mencionado anteriormente, haciendo uso del nivel freático para el proceso de desalinización, sumado a esto, al hacer uso de material biodegradable que se produce en el país sin dejar de lado las condiciones del suelo, su uso y vocación, se incentiva la economía circular, generando un valor agregado en este caso no solo para las empresas del sector floricultor con problemas de salinidad, sino también para los productores de coco, ya que se fomentaría un modelo de cooperación entre estos dos sistemas de producción agrícola, viéndose beneficiadas las comunidades que no hacen uso de sus suelos porque no son productivos debido a la cantidad de sal que almacenan, haciendo uso de la cáscara de coco que es un material económico, de fácil adquisición y se encuentra en el país, por lo que se promueve la economía interna.

Social: En esta dimensión se conoce que no solo se dejan de aprovechar los suelos para agricultura, sino también se pierden todas las funciones ecosistémicas según el nivel de degradación del suelo, entre ellas se encuentra la posibilidad de vida y establecimiento humano. La FAO (2013) estima que el 40% de los alimentos que se producen en el mundo se siembran en suelos propensos a salinidad, por lo que esta problemática representa alto peligro para la seguridad alimentaria a nivel global, sobre todo tomando en cuenta la población prevista para 2050 que será de nueve mil millones de personas (FAO, 2015). Pero esta problemática no solo tiene implicaciones sociales de seguridad alimentaria, sino que como estos procesos salinos también se presentan en zonas húmedas, como el caso de algunos cultivos de flores en la planicie de Bogotá, representa un conjunto de problemáticas más grandes al interpretar la diversidad dinámica y geográfica de la zona y del país (IDEAM et al., 2017).

También es importante señalar, que algunos países desarrollados que se han visto afectados por problemas de suelos salinos, han implementado políticas y planes de manejo para sobrellevar y corregir este inconveniente, sin embargo, en los países en desarrollo como el caso de Colombia, la gestión de los suelos ha sido marginada, por lo que la degradación derivada de la salinización ha prevalecido ante la planeación de uso y manejo del suelo en el país, teniendo una tendencia preocupante teniendo en cuenta que la capacidad de adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático es cada vez mayor (IDEAM et al., 2017).

Por ende, al adoptar este modelo biomimético se puede llegar a mitigar el efecto a corto, mediano y largo plazo de los efectos de la salinidad en los suelos, teniendo en cuenta que el suelo es un bien social y esta propuesta no solo presenta una solución a nivel ambiental, sino también toma en cuenta las necesidades sociales y restricciones económicas, previniendo la pérdida de los suelos y por ende de la productividad de los cultivos de rosa en la Sabana de Bogotá y en el país, así como otros cultivos que aseguran dinámicas sociales y estabilidad financiera en los hogares de los colombianos.

Como se ha mostrado, este trabajo se encamina hacia la línea de investigación *Ingeniería para la sostenibilidad de sistemas naturales*; según el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la

República Argentina (Giuliano, 2014) citado en Machín Armas et al. (2017) “Ingeniería es la profesión en la que el conocimiento de las ciencias matemáticas y naturales adquiridas mediante el estudio, la experiencia y la práctica, se emplea con buen juicio a fin de desarrollar modos en que se puedan utilizar, de manera óptima, los materiales y las fuerzas de la naturaleza en beneficio de la humanidad, en el contexto de restricciones éticas, físicas, económicas, ambientales, humanas, políticas, legales y culturales”.

Es por ello que el ingeniero ambiental no solo diseña una nueva técnica de remediación para el suelo, sino que con la implementación de este tipo de prácticas se mejora y aprovecha el ambiente de manera sostenible, como lo menciona Machín Armas et al. (2017):

“Es a través del contenido de las ciencias básicas, las ciencias de la ingeniería y las disciplinas humanísticas tratadas en el contexto de los problemas del mundo actual, impregnadas además por la ética que le pueda integrar el profesor, la vía para formar al ingeniero para la sostenibilidad”.

En adición a esto es importante resaltar que la ingeniería bio-inspirada no rompe el pensamiento clásico de la ingeniería tradicional, por el contrario, lo utiliza como fundamento para innovar en las soluciones propuestas a las problemáticas de la humanidad aportando a la solución de los problemas a través de la imitación de la naturaleza, por esta razón, en el desarrollo de proyectos, se pueden obtener recursos del entorno y al utilizarlos dentro de la misma zona se logra minimizar el uso de recursos como son los transportes de los materiales y al terminar el proyecto se devuelven a su medio natural contribuyendo con el medio ambiente al disminuir la huella ecológica y prolongar la vida útil de estos materiales, contribuyendo también a disminuir costos económicos e incentivando la economía circular dentro de los sistemas productivos. Así mismo, este trabajo genera una base teórica y experimental para la implementación de alternativas ingenieriles que adaptan la biomimesis a la solución de una problemática ambiental, social y económica, en este caso la salinidad de los suelos, desde la visión de sostenibilidad que enmarca la ingeniería ambiental.

6 Objetivos

Evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tenjo - Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo.

1. **Seleccionar** los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo.
2. **Adaptar** el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos en cultivo de rosa bajo cubierta de invernadero.
3. **Correlacionar** el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisoría de recuperación sostenible.

7 Marco de referencia

7.1 Antecedentes

En este apartado se hará énfasis en la biomímesis y cómo se ha hecho uso de esta “nueva” ciencia en diferentes campos relacionados a la ingeniería, tomando fuerza día a día debido a los buenos resultados que ha presentado su aplicación enfocados hacia la ingeniería ambiental, por ejemplo, aprovechando adecuadamente los rayos solares que se reflejan en las fachadas de los edificios calentando el aire interno, se benefician los procesos de ventilación porque se crea una circulación continua renovando el aire al interior del edificio demuestra que la biomímesis si es efectiva en los procesos arquitectónicos y es un método económico y funcional que preserva el medio ambiente. La naturaleza ha evolucionado al punto tal de tener procesos eficientes y sostenibles, teniendo como principio básico el uso de los recursos disponibles, además del uso y transformación eficiente de la energía, la producción en sistemas cerrados, entre otros (Moreno De Luca et al., 2012). Tomando en consideración las aplicaciones de la inspiración y estudio de los procesos en la naturaleza, el presente estudio pretende indagar en el transporte de líquidos en plantas vasculares lo que conlleva a generar una reinterpretación de la naturaleza aplicada a procesos antrópicos como los expuestos anteriormente.

La ingeniería en su desarrollo y evolución ha dado solución a diferentes necesidades, sin embargo, también ha contribuido a sobrecargar la biósfera, por esto, la biomímesis integra los resultados ingenieriles asociados a un objetivo social colectivo, presentando una visión que supera las soluciones actuales, los autores Jiménez Iguarán & Ramírez (2016), en el artículo titulado “*Biomímesis: una propuesta ética y técnica para reorientar la ingeniería por los senderos de la sustentabilidad*”, reconocen que la crisis ambiental no deja de imponer retos a los diferentes saberes, pero estos son aún mayores cuando se evalúan desde la sostenibilidad, por esto la ingeniería no debe buscar resultados por sí misma, sino encontrar en la biomímesis un apoyo en búsqueda de un objetivo colectivo, manteniendo alta calidad de vida para el hombre, pero también garantizando la existencia y hábitat de las demás especies. Aunque la ingeniería busca la resolución experimental de las problemáticas, se ha limitado la capacidad resiliente de los ecosistemas, por lo que se requiere la incorporación de diseños bioinspirados con fundamento ético-ambiental que permita la compatibilidad tecnológica con el funcionamiento de la biósfera, y se fortalezcan las relaciones simbióticas sustituyendo el rol del hombre como depredador a favorecedor, donde se establece la necesidad de tener en primer lugar a la naturaleza para dar respuesta a cómo debe funcionar la sociedad.

En el mismo orden de ideas, la biomímesis está fuertemente relacionada con la ingeniería ambiental, puesto que ambas buscan apoyar y dar una aproximación al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, teniendo en cuenta que el objetivo biomimético y de la ingeniería en relación a la producción y consumo de bienes y servicios, busca reducir el impacto en el ecosistema, además de fomentar estilos de consumo responsables; otro de los ODS destacados es la acción por el clima, puesto que la a través de estas ciencias se puede lograr un cambio actitudinal en la población, consiguiendo entonces no solo minimizar la emisiones y contaminación ambiental, sino innovar a partir de soluciones que respeten el ecosistema pero vayan de la mano a los principios sociales y económicos de la población. Por último, se destaca el ODS 15 relacionado a la vida de ecosistemas terrestres, debido a que a partir de la observación de los organismos vivos, se suscita a la conservación de la biodiversidad y el equilibrio del ecosistema, teniendo en cuenta que la biomímesis basa las soluciones a las problemáticas del hombre a partir de la naturaleza, alcanzando entonces no solo

innovar responsablemente, sino mantener el estado de la relación hombre-ecosistema en simbiosis con la mínima afectación posible (Biomimetic Sciences Institute, 2020).

Al hacer la compilación de resultados obtenidos en otras investigaciones relacionadas con la remediación de suelos salinos a partir de modelos biomiméticos, y luego de la recolección bibliográfica se precisa que son pocos o casi nulos los estudios llevados a cabo en la recuperación de suelos salinos, a partir de la simulación del proceso de capilaridad de las plantas vasculares. Sin embargo, la preocupación por tratar de resolver la problemática central (salinidad de los suelos), ha derivado en numerosas investigaciones que han dado como resultado un significativo número de técnicas de remediación y/o descontaminación de las sales presentes en el suelo, entre las que se destacan técnicas de recuperación fisicoquímicas y biológicas como: extracción, lavados, pozos de recirculación, electrocinética, adición de enmiendas, oxidación ultravioleta, fitorremediación, entre muchas otras (Dorado, Ortiz, Sanz, & Villar, 2007). Como consecuencia de lo anteriormente mencionado, se tienen diversas investigaciones en los demás métodos de remediación, pero no sobre el tema de investigación del trabajo de grado en curso, es decir, la simulación biomimética de plantas vasculares y que se pueda realizar de manera sostenible.

Por otro lado, se debe tener cuenta que para dar paso a la presente propuesta de integración biomimética con la ingeniería ambiental para lograr la remediación de suelos salinos, se deben investigar procesos complementarios que ayuden en la recuperación de los suelos. Por lo anterior, se ha intentado adaptar plantas a suelos salinos de diferentes tipos (salinos, salino sódicos, sódicos), sin embargo, no todos los resultados han sido favorables, puesto que en la literatura se encuentra que la fitorremediación de este tipo de suelos, aunque bien se puede realizar con plantas costeras como lo es el mangle, no arroja muy buenos resultados para pruebas en sabanas con otras especies.

Ahora bien, se encuentran resultados efectivos en ecosistemas áridos como lo reporta Ayala Flores et al. (2009) en el estudio titulado “*Recuperación de suelos salinos mediante el cultivo del Q’AWCHI*”, donde se ejecuta la plantación de Q’AWCHI, planta arbustiva que comúnmente se da de comer al ganado bovino, ovino y camélidos en zonas áridas y que presenta alto potencial para remediar el suelo salino, logrando una solución no solo ambiental, sino también social y económica para la comunidad.

En relación con las ideas previas, también se encuentra el estudio realizado por Carretero Montero (2002) titulado “*Tolerancia a la salinidad de plantas de mandioca (Manihot esculenta Cranz): Influencia de la micorriza*”. Esta tesis doctoral logra recopilar cinco casos estudios diferentes para posteriormente comparar la tolerancia de la mandioca (yuca) a la sal; primero se evaluó la propagación in vitro, seguido de la influencia de la salinidad (NaCl) en el desarrollo de plantas de mandioca in vitro, posterior a conocer el comportamiento in vitro de la plantación se procedió a medir la tolerancia a la salinidad en condiciones de invernadero. Así mismo, se evaluó el efecto de la micorriza en la mandioca y por último, se desarrolló la plantación in vitro y ex vitro del clon SOM-1 de mandioca, procedentes de las plantas micorrizadas y no micorrizadas con el fin de evaluar la mejor alternativa para la siembra de mandioca y la influencia de la micorriza en esta.

La necesidad de evaluar las diferentes fases mencionadas, son importantes puesto que las acciones de la salinidad sobre las plantas se fundamentan principalmente en las relaciones energéticas, relaciones hídricas y relaciones nutricionales entre la planta-medio. Es por ello que se menciona que la adaptación de las plantas a la salinidad puede generar disminución en reservas energéticas, descenso del potencial

hídrico del suelo, y alteración en la nutrición de la planta lo que repercute directamente en el crecimiento de la planta y en la productividad del cultivo. Para analizar la tolerancia de las plantas a la salinidad se deben tener en cuenta tres criterios propuestos por Mass (1986) que son supervivencia, producción o biomasa absoluta y producción o biomasa relativa como se cita en (Carretero Montero, 2002). Los dos primeros son de interés agronómico añadiendo el interés económico, puesto que se limita la comparación de diferentes cultivos; por su parte la biomasa relativa compara diferentes tratamientos de salinidad con las producciones obtenidas en ausencia de sal en el sustrato.

En consecuencia, el anterior estudio es relevante para esta monografía, puesto que se sustenta en que aunque en la actualidad se cuenta con diferentes técnicas desarrolladas por el hombre para la remediación de suelos salinos, existe una estrategia más antigua y extendida que ha evolucionado en la misma naturaleza y es la asociación entre individuos para mejorar su adaptación al medio, concepto que se entiende como simbiosis. Esta asociación se ha visto en alga-hongo (líquenes) o planta vascular-bacteria (Leguminosas-Rhizobium) y otras entre plantas vasculares y hongos denominadas micorrizas, base del trabajo en mención (Carretero Montero, 2002).

Carretero Montero (2002) concluye a partir de las diferentes evaluaciones realizadas, que se requiere el desarrollo de estrategias para seleccionar material vegetal que posteriormente se adapte a la zona de aplicación y conserve o aumente los rendimientos del cultivo actual. Esta metodología requiere la recolección de plantas adaptadas a la salinidad, donde se garantice estabilidad genética y buen estado sanitario, por lo que un cultivo in vitro es el método apropiado para conseguir estas condiciones. En esta tesis se consigue la propagación de tres clones de mandioca; además, el cultivo in vitro en medio salinizado presenta problemas en la tolerancia a la sal tanto de las células como de la planta en general, ya que se demuestra la fuerte sensibilidad a la presencia de la sal. Los clones cultivados en invernadero y sometidos a solución salina presentaron igual tolerancia que el cultivo in vitro.

Se demuestra el descenso de producción de biomasa en las plantas por el efecto de la sal, igualmente se observa la disminución del grado de hidratación foliar en especial en los clones menos halotolerantes, además de acumulación de Na⁺ y Cl⁻ produciendo entonces efectos osmóticos y tóxicos (Carretero Montero, 2002).

En este orden de ideas, al indagar el proceso de fitorremediación de las plantas vasculares en el contexto nacional, basado en la absorción y retención de un compuesto químico en el suelo, teniendo en cuenta que las plantas vasculares son generalmente las más tolerantes, Franco Ariza (2017) en “*Evaluación de la actividad fitorremediadora de Baccharis latifolia (Ruiz & Pav.) Per en suelos contaminados con metales pesados en la cuenca alta del río Bogotá. Villapinzón (Cundinamarca)*”. define el concepto de bioacumulación como “un aumento en la concentración de un producto químico en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (...) siendo las plantas vasculares ligeramente más tolerantes”.

El proceso anteriormente mencionado, lo pueden llevar a cabo diversas especies, como las pertenecientes a la familia *Brassicaceae* (entre ella coles y repollos), de acuerdo con Franco Ariza (2017) estas plantas vasculares son viables puesto que el proceso fitorremediador que llevan a cabo es utilizado a nivel mundial para la recuperación de suelos contaminados, adicionalmente Bernal Figueroa (2014) reporta que dicha técnica de tratamiento de suelos posee ciertas ventajas entre las que se encuentran las siguientes: Es de bajo costo al no necesitar personal especializado en su manejo, ni

consumo energético; no produce contaminantes secundarios, dejando de lado la necesidad de un terreno o sitio para su depósito; tiene versatilidad para tratar múltiples agentes contaminantes.

Otro caso revisado para este proyecto, se realiza en el Centro Agropecuario Marengo, Mosquera, Cundinamarca, por Osorno Reyes & Salas Garcia, (1987) “*Respuesta de cinco especies vegetales a niveles de salinidad y sodio en suelos del Centro Agropecuario Marengo*”, donde se evaluaron los niveles de salinidad tolerante del maíz, la papa, la cebada, el repollo y la arveja, obteniendo entonces los mejores resultados de tolerancia para la cebada seguida del repollo, atribuido a la exclusión de la absorción de la sal por parte de las raíces de cada una de estas especies.

Adicionalmente, se realiza la revisión del proyecto de grado “*Evaluación documental de los métodos de restauración de suelos salinos, con influencia en el distrito de riego Usochicamocha, departamento de Boyacá*” por Girón Pinto (2019), en esta revisión se comparan técnicas de aplicación de enmiendas químicas y orgánicas, fitorremediación con vegetación halófila y biorremediación con colonias de bacterias halófilas, donde las variables fueron costo, tiempo, impacto ambiental y eficiencia de remoción de sales.

Esta revisión documental anteriormente citada, también presenta condiciones ecosistémicas semejantes a la zona de estudio en este proyecto, en ella se concluye que de los tres métodos evaluados la alternativa mejor adaptada al Distrito de Riego de Usochicamocha es la fitorremediación, debido al uso y vocación de suelo, y las fuentes y causas de la salinidad presentadas. Factores principalmente económicos conllevan a que las enmiendas químicas y orgánicas además del uso de microorganismos halófilos sean inviables en esta región, a pesar de su alta eficiencia que oscila entre el 75% y 90% para ambos métodos (Girón Pinto, 2019).

Los impactos identificados para los 3 métodos de remediación fueron positivos respecto a “la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo, su estructura floculada por el calcio, la disminución del sodio en el complejo de cambio, aumento en la permeabilidad, mejora en el drenaje, la infiltración y la conductividad hidráulica, disponibilidad hídrica, disminución de la presión osmótica, desarrollo de la rizósfera e incremento en las poblaciones microbianas nativas” (Girón Pinto, 2019), también influye el tiempo de tratamiento, que oscila entre los 2 a 5 meses para los métodos mencionados. Lo anterior, se deriva en el aumento de productividad del suelo, sin embargo, no se puede aplicar cualquiera de ellos sin antes evaluar el contexto económico, social y ambiental en el que se lleve a cabo la remediación.

Este último mencionado, se sustenta también con base al artículo “*Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad*” desarrollado por Zúñiga Escobar et al. (2011) donde se plantea la aplicación de tres tratamientos: biofertilizantes, biopolímeros y electromagnetismo comparándolos con la teoría USDA (United States Department of Agriculture) basada en enmiendas químicas yeso-azufre. La aplicación de estos tratamientos se realizó en 2 Ha. de un cultivo de maíz ubicado en la Hacienda Las Gramas, municipio de Roldanillo, Valle del Cauca. Este tratamiento se desarrolló en un periodo de 5 meses, teniendo en cuenta que las zonas susceptibles a salinización abarcan principalmente la región Caribe, los valles interandinos (Ríos Magdalena y Cauca), y los altiplanos donde se desarrolla y se planea ampliar la frontera agrícola para producción intensiva.

En este estudio se menciona que las tres tecnologías comparadas frente a la USDA se utilizaron en los últimos 30 años por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, sin embargo, se comprobó su ineficiencia y el aumento en costos generados a los agricultores. Para realizar la evaluación se utilizó un diseño aleatorizado, definiendo “variables explicativas (variables físicas del suelo: macro porosidad y densidad aparente) y variables respuesta (variables fisiológicas del cultivo: diámetro, número de hojas, eficiencia fotosintética, potencial hídrico, población, número de mazorcas por planta, perímetro transversal de la mazorca, número de filas de granos por mazorca, biomasa ganada en maíz)” (Zúñiga Escobar et al., 2011)

De acuerdo a lo anterior, se concluye que los tratamientos que hacen uso de microorganismos tienen mayor respuesta en fisiología y productividad, resalta la estimulación electromagnética al acelerar la actividad microbiana lo que aminora el tiempo de tratamiento. Adicionalmente, se espera que con la aplicación de los productos orgánicos junto con la estimulación electromagnética se disminuya la salinización del suelo, además de establecer el equilibrio entre el suelo, el biofertilizante, las plantas y los agentes patógenos. También se menciona cómo los biofertilizantes y los biopolímeros aliviaron las propiedades físicas del suelo debido a la pérdida de compactación y mejora en la estructuran (Zúñiga Escobar, et al., 2011).

En el mismo orden de ideas, es necesario resaltar el aporte del “*Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización*” el cual “ofrece los lineamientos técnicos y de planificación para la identificación, la zonificación, el análisis y la evaluación del proceso de degradación de los suelos por salinización a nivel nacional, regional y local, de cara al monitoreo y seguimiento del estado de la degradación de los suelos por salinización”, estudio que suministra gran parte de la información existente sobre la problemática de salinidad en suelos del país (IDEAM et al., 2017).

Adicional a lo anterior, con este protocolo se propone y adoptan las bases conceptuales y metodológicas para lograr la identificación y evaluación de los suelos, reconocimiento los rasgos de la salinización que permiten elaborar mapas de zonificación que sirven para estudios como el desarrollado en este documento. Igualmente realiza la evaluación de las causas y consecuencias desde la perspectiva social, económica, cultural y ecológica logrando establecer las bases para la prevención, mitigación, rehabilitación y adaptación de los suelos en condiciones de salinidad (IDEAM et al., 2017).

Con el propósito de evaluar de dónde se deriva esta propuesta, es necesario precisar el artículo base de la presente investigación “*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*” de Swallow & O'Sullivan (2019), esta investigación expone que generalmente la remediación de los suelos salinos se basa en métodos tradicionales como el lavado del suelo y la fitorremediación con el fin de trasladar las sales más abajo de la raíz de las plantas, sin embargo, no siempre se tiene éxito, puesto que las sales pueden volver a subir no solo hasta la raíz sino hasta la superficie del suelo por efecto de capilaridad. Adicionalmente justifica como la aplicación del ferrocianuro de potasio se ha utilizado para remediar el suelo salino, debido a que es un indicador visual por causa de la eflorescencia de las sales a medida que el agua se evapora, sin embargo, esta aplicación no es tan exitosa en suelos arcillosos ni cuando se realiza reaplicación de agua para lograr una mayor remoción de sal.

Por lo anterior, Swallow & O'Sullivan investigan el enfoque biomimético para desalinizar el suelo, imitando los mecanismos de transporte capilar que llevan a cabo las plantas vasculares, utilizando la

evapotranspiración para trasladar el agua desde el suelo hasta la superficie del mismo, donde a través del ferrocianuro de potasio eflorace y se observan los cristales de sal contenidos en el suelo. Esta investigación logró reducir la concentración de sales del 8% al 0,8% en el suelo, resaltando también el cambio en el indicador de salinidad CE de 120 a 14 mS/cm, destacando entonces que de los cuatro diferentes tratamientos realizados al suelo problema, se lograron resultados importantes con el fin de proponer una herramienta eficaz para desalinizar el suelo y reducir la salinidad a nivel global (Swallow & O'Sullivan, 2019). Dentro de este orden de ideas, se desarrolla la investigación plasmada en este documento.

7.2 Marco teórico conceptual

En este apartado teórico conceptual se presentan los principales conceptos para comprender el desarrollo de la propuesta de aplicabilidad de la biomimesis en la ingeniería ambiental, a través del caso estudio suelos salinos en cultivos de rosa, como se muestra a continuación: biomimesis, suelos salinos y fisiología vegetal.



Figura 2. Contextualización Marco teórico-conceptual
Elaboración propia

En la figura anterior se resume de manera sencilla los conceptos relevantes dentro de los tres temas principales sobre los que se sustenta la presente investigación

7.2.1 Biomimesis

La Real Academia de Ingeniería define la biomimesis como la “Ciencia que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración, nuevas tecnologías innovadoras para resolver aquellos problemas humanos que la naturaleza ha resuelto, mediante los modelos de sistemas (mecánica), procesos (química) y elementos que imitan o se inspiran en ella” (Real Academia de Ingeniería, 2020) y lo ya mencionado en apartados anteriores, se resalta su objetivo para lograr soluciones sostenibles, hacia lo

que apunta también la ingeniería ambiental, por lo que es conveniente resaltar las definiciones de analogía biomimética y biomímesis sustentables, las cuales son aportes conceptuales al desarrollo del proyecto.

Biomímesis: Es una práctica que aprende e imita las estrategias que se encuentran en la naturaleza para resolver los desafíos del diseño humano, y encontrar esperanza en el camino (Benyus & Garcia Leal, 1997).

Analogía biomimética: Permite establecer la importancia que tiene la biomimética en el diseño de soluciones en cualquier ámbito (López-Forniés & Berges-Muro, 2014)

Biomímesis sustentable: Permite establecer con claridad el papel que juega la biomímesis en la búsqueda de aplicaciones para el ingeniero ambiental (Riechmann, 2004).

Al ser la biomímesis una simulación llevada a la práctica, que imita la naturaleza para lograr dar solución a los desafíos que se le presentan al hombre en su cotidianidad, se presenta como una alternativa viable hacia la remediación de suelos salinos, pues al recuperar los cuerpos naturales dinámicos se permite dar uso de los mismos nuevamente, pero de manera adecuada (Benyus, 1997; Soil Taxonomy, 1982). Considerando lo anterior, la ingeniería ambiental busca mantener el equilibrio ecológico del sistema sin desatender las dimensiones sociales y económicas que a él pertenecen (Merino, 2009), por lo cual, a partir del estudio, conocimiento, experimentación y aplicación de ciencias como la biomímesis, se obtienen soluciones sostenibles que propenden por una mejor calidad de vida no solo del hombre sino del ecosistema.

Por lo anterior, es necesario tener en cuenta la diferencia entre la recuperación definida por la USEPA (1999) como “el uso de procesos naturales para contener la propagación de la contaminación por vertidos químicos y reducir la concentración y la cantidad de contaminantes en los sitios contaminados”, citado en (Xiong, 2015); y la remediación que es el conjunto de operaciones o tratamientos que se realizan con el objetivo de recuperar la calidad del suelo contaminado (Li et al., 2019).

7.2.2 El suelo

El suelo se define como la “colección de cuerpos naturales que descansan sobre la superficie de la tierra, contiene materia viviente, capaces de soportar plantas y son el resultado de una serie de factores formadores del suelo, con un sistema trifásico” (Service-USDA, 2014).

El suelo proporciona el soporte físico y agarre de las plantas, así como los nutrientes pertenecientes a este. El suelo, además, es un sistema complejo donde confluyen todas las reacciones físicas y químicas sobre las raíces y crecimiento de la planta. Es tanto así, que el sistema suelo-raíz es una serie de largas y complejas dinámicas para comprender la vida en el planeta. La textura del suelo se refiere al tamaño y distribución de las partículas, subdividida en proporciones de arena, limo y arcilla. Por lo anterior, se hace más complejo comprender las dinámicas del suelo y el agua con la planta, puesto que depende de las propiedades propias de cada suelo (Bidwell, 1990).

En este sentido se resalta de la textura que las arcillas presentan una carga eléctrica negativa, lo cual induce que absorba cationes como las sales solubles, se especifica que los suelos arenosos tienen 5 meq/100, los francos de 5 a 15 y los arcillosos de 15-25 meq, es decir, una mayor conductividad eléctrica depende de igual manera de la textura (Herrero, 1985).

Así y todo, es necesario señalar que el origen, estructura y composición del suelo tienen una gran influencia en la manera de aireación y las relaciones hídricas en los suelos, así como con las cantidades y la disponibilidad de los minerales que el suelo contiene. Estos factores determinan el tipo de plantas que pueden crecer en el suelo y los problemas fisiológicos que estas pueden enfrentar durante su crecimiento. El agua presente en el suelo o agua edáfica es retenida por la fuerza de absorción o por la presión hidrostática y deja el suelo por condiciones de evaporación o absorción por parte de las raíces (Bidwell, 1990)

Se puede distinguir que el suelo puede poseer características de anfótero, dicho de otra manera, un medio que reacciona como ácido o como base según sea el caso. El suelo cuenta con una gran disponibilidad de iones y un complejo sistema de intercambio dando lugar a que la remoción de iones del suelo por las raíces determine la liberación de más iones de este complejo intercambio. De esta manera se mantiene un equilibrio dinámico entre la planta, el agua del suelo y sistema de intercambio, con la finalidad de que más nutrientes puedan estar disponibles para la raíz conforme se remueven, o mientras más agua se añada al suelo (Bidwell, 1990)

Para que el agua logre pasar por el suelo, se requiere carga eléctrica superficial y la disposición y distribución de las partículas del suelo. Lo anterior determina la fuerza de retención y la cantidad de agua retenida a pesar de la presencia de la fuerza de gravedad, dando paso al término de potencial hídrico, referido a la capacidad de retención de agua (Azcón-Bieto & Talón, 2013). Por lo anterior, se debe resaltar la definición del porcentaje saturación de agua propuesto por Azcón-Bieto & Talón, (2013), donde entre más saturado sea el suelo de agua más solubles son las sales, haciendo así que se solubilizan más fácil en el medio poroso del suelo, ayudando además a su transporte por este medio. Es necesario hacer énfasis en este término puesto que gracias a la solución de agua suelo las sales logran transportarse a través del medio.

7.2.2.1 Suelos salinos

Los suelos salinos son aquellos suelos que presentan cantidades significativas de sales más solubles que el yeso interfiriendo en el crecimiento de los cultivos y plantas sensibles que en ellos se desarrollen; los suelos sódicos son aquellos donde el ion monovalente Na^+ desplaza otros elementos y se fija a la estructura superficial (Courel, 2019); por último los suelos salino-sódicos se presentan por la concentración excesiva de las sales solubles, sodio intercambiable o ambos, es por esto que para la agricultura representa un problema al que se debe presentar la aplicación de medidas y prácticas remediadoras adecuadas. Estas sales producen efectos dañinos en las plantas, puesto que hay un aumento en la concentración de sal contenida en el suelo y se incrementa la saturación de sodio intercambiable. Las sales solubles están compuestas principalmente por cationes de sodio, calcio y magnesio, y por iones de cloruro y sulfato en varias proporciones; la fuente de estas sales son los minerales primarios que se encuentra en la corteza terrestre (Osorno Reyes & Salas Garcia, 1987).

Se hace necesario entonces definir la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las sales solubles, según la FAO (2020) el primero de ellos es un indicador de la cantidad de cationes que son retenidos en el suelo y son intercambiados por otros que están presentes en el suelo, presentando un ascenso en las sales presentes en este medio. Cuando se crea un exceso de cationes como calcio y sodio inhiben el aumento de micronutrientes en el suelo. Por su parte, cuando se habla de salinidad como se ha mencionado anteriormente, la salinidad en el suelo se establece como la concentración de las sales solubles. Entre las cuales se encuentran: cationes como son Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio y Aniones que son sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos.

Ahora bien, Shahid et al., (2013) definen la salinidad como la cantidad relativa de sales disueltas en suelo, principalmente por la presencia de sodio. Teniendo en cuenta la definición anterior, Courel (2019) afirma que la salinidad en suelos se mide por medio de la Conductividad Eléctrica (CE), en los suelos salinos se ha establecido que su valor debe ser $CE > 4$ dS/m a 25°C ; mientras los suelos sódicos se precisan porque el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) es $> 15\%$ o la Relación de Absorción de Sodio (RAS) es $> 13\%$.

La conductividad eléctrica (C.E) es una medida de la cantidad de sales solubles (concepto anterior) en el agua. Es así, como existe una relación directamente proporcional entre la salinidad y la conductividad eléctrica, dejando en claro que, los iones disueltos de estas sales aumentan la capacidad del suelo para transportar o conducir corriente eléctrica (Herrero, 1985). Por otra parte, la relación de absorción de sodio (RAS) es una relación que representa una medida de sodicidad, permitiendo conocer la proporción relativa en la que se encuentra el sodio respecto al calcio y magnesio, que son elementos que se compiten el lugar de intercambio con el sodio; de igual manera, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) representa una medida de sodicidad, o sea, las concentraciones del ion sodio en solución en el complejo de cambio (ocurre cuando se da la dispersión de las partículas de arcilla y por añadidura genera el bloqueo de poros, lo que lo hace impermeable). En otras palabras, se puede definir el PSI como la cantidad de sodio adsorbido por las partículas del suelo (FAO, 2020).

A continuación, se mencionan los principales factores por los que estas sales se acumulan en los suelos mencionados por Osorno Reyes & Salas García (1987):

Intemperismo de minerales: La fuente original de las sales son los minerales y rocas que se liberan durante el proceso intempérico, el CO_2 atmosférico y biológico forman con el agua ácido carbónico, que ataca los minerales. En las regiones áridas el bicarbonato formado se acumula en el suelo y al concentrarse puede pasar a carbonato.

Aguas superficiales: Las regiones áridas tienen sistemas de drenaje natural mal desarrollado, insuficiente para evacuar las aguas lluvias, estancándose en las partes bajas, donde al evaporarse se acumulan también las sales procedentes de las zonas más altas. También puede producirse salinización por las inundaciones periódicas en valles aluviales, las aguas de inundación dejan en el suelo altas cantidades de sal. En ambos casos, las aguas superficiales se infiltran y hacen ascender el nivel de las aguas freáticas, la sal asciende a la superficie a partir del nivel freático.

Riegos: El uso de agua con alto contenido salino es la causa de la salinidad en la mayor parte del mundo, pero principalmente, se debe al no tener drenajes adecuados para evacuar el agua sobrante, también es importante tener en cuenta que el cuándo el agua de drenaje aumenta también lo hace el

nivel freático alcanzando entonces la altura suficiente para llegar a la superficie por capilaridad y llevando consigo las sales del suelo.

7.2.2.2 *Proceso de salinización en el suelo:*

La salinización es un proceso natural asociado a diferentes causas, entre ellas se encuentra el cambio abrupto en la vegetación y usos antrópicos, de igual manera la climatología es un determinante para definir la velocidad con que el proceso puede aparecer en un suelo (Milione, 2019).

En condiciones húmedas las sales solubles se encuentran originalmente en los materiales del suelo y han sido formadas por intemperización de minerales, estas son llevadas a las capas inferiores hacia el agua subterránea y por último arrastradas a los océanos, por esta razón, los suelos salinos no existen en las regiones húmedas, exceptuando que el suelo haya estado expuesto al agua de mar. Por su parte, en las regiones áridas el lavado es local y las sales no son transportadas muy lejos, debido a que no hay suficiente precipitación para lavar y transportar las sales, adicionalmente la elevada evaporación tiende a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial (Osorno Reyes & Salas Garcia, 1987).

Para que el suelo presente salinidad se necesitan cinco condiciones (Osorno Reyes & Salas Garcia, 1987) y puede observarse de forma gráfica en las *figuras 3, 4 y 5*:

1. Poca humedad en el aire.
2. Una capa impermeable en el subsuelo.
3. Sal acumulada en el horizonte encima de la capa impermeable.
4. Agua estancada sobre la capa impermeable y no muy profunda desde la superficie del suelo.
5. Riego con agua salada.

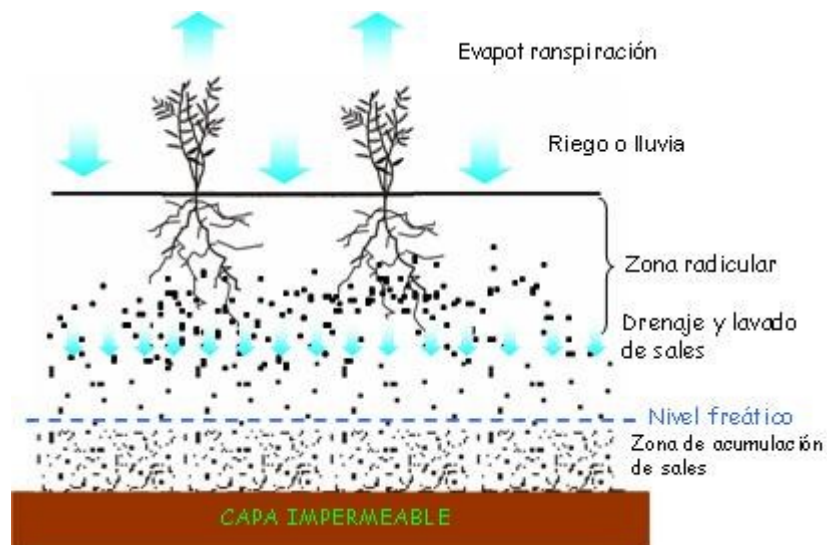
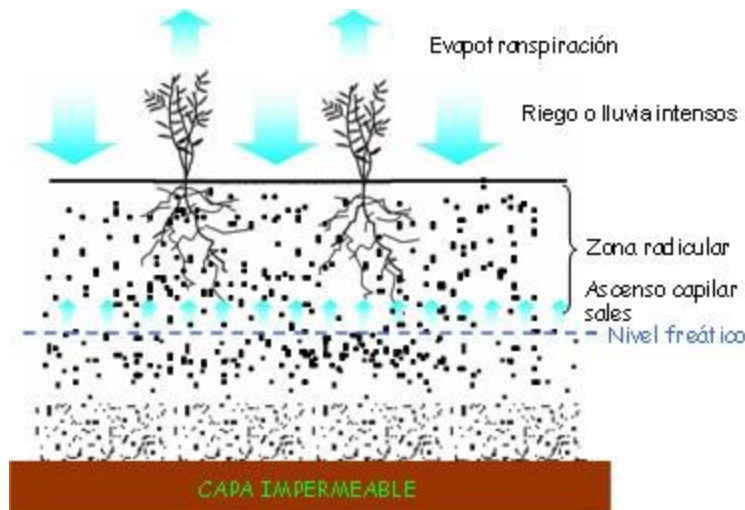


Figura 3. Acumulación de sales en el suelo.

Fuente (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015)

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, cabe mencionar los efectos de la salinidad sobre las propiedades de los suelos, primeramente, en el ambiente, los procesos de salinización se presentan en suelos donde la evapotranspiración potencial se sobrepone a las precipitaciones, este proceso tiene lugar en ambientes áridos y semiáridos, por lo que las sales tienden a acumularse en posiciones topográficas de fondo ya que han sido transportadas por el agua de escorrentía superficial o subsuperficial. En cuanto a los efectos sobre las propiedades edáficas físicas, la acumulación de cloruros y sulfatos de sodio y magnesio provocan altas concentraciones en la fase líquida del suelo, por lo que resulta favorable pues se presenta una doble capa eléctrica que favorece el proceso de floculación y esto repercute favorablemente en la fertilidad física de los suelos salinos (se presenta formación de agregados, favoreciendo la estructura) (Courel, 2019).



*Figura 4. Acumulación de sales en el suelo con exceso de riego.
Fuente: (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015)*

Se sabe que cuando las sales solubles se concentran en el perfil de suelo y exceden ciertos límites, generan condiciones que impactan el crecimiento de las plantas. Esto puede derivar en diversos efectos que dependen de la intensidad, cantidad, tipo de sales predominantes, clima y características fisicoquímicas del suelo. Esta acumulación de sales disminuye el volumen de agua aprovechable puesto que se aumenta el potencial osmótico, algunos iones pueden llegar a ser tóxicos al ser absorbidos y acumulados en los tejidos de la planta, así como generar daños por acumulación en las superficies foliares o en la solución de suelo (Amézquita et al., 2001).

El elemento sodio (Na) afecta directamente los suelos, y de manera directa o indirecta las plantas, debido a que la concentración de este causa la dispersión y expansión de arcillas, por lo que se cierran los poros conduciendo al deterioro acelerado de las condiciones físicas, alterando la estructura, disminuyendo la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración, además de su toxicidad específica (Amézquita et al., 2001).

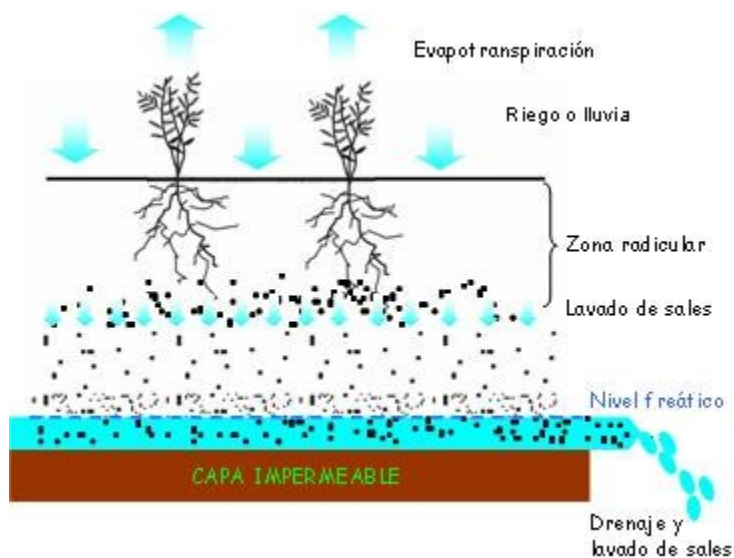


Figura 5. Acumulación de sales en suelo con buen drenaje.
Fuente (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015)

Las regiones más susceptibles a desarrollar problemas de salinidad son aquellas donde la precipitación es reducida para satisfacer las necesidades de evapotranspiración del suelo y de las plantas, lo que favorece la concentración de la solución y la precipitación de minerales, impidiendo llevar a cabo algún grado de lavado de sales acumuladas en la zona radicular. Sin embargo, también puede presentarse en regiones húmedas bajo condiciones que incluyen alta demanda evaporativa y nivel freático superficial (Amézquita et al., 2001). En Colombia más específicamente se puede observar en el Anexo 2 del presente documento, aquellas zonas identificadas por el IGAC (2017) que tienden a ser más susceptibles a este proceso, no solo por condiciones naturales sino por los procesos antrópicos que se llevan a cabo.

Estudios más recientes sobre el desarrollo del suelo citados por Amézquita et al. (2001), se generaliza el hecho de que los suelos son sistemas abiertos donde operan diferentes procesos, estos procesos son complejos desde los cambios químicos, físicos y biológicos involucrados. “En algunos casos el resultado neto de su acción en la producción de un perfil determinado, con presencia de horizontes diagnósticos como, por ejemplo, cuando hay eluviación de arcillas de los horizontes superiores a los inferiores, creando un horizonte argílico en el cual la acumulación de Na proveniente del agua de riego o del ascenso capilar a partir del agua freática, pueden dar origen a un horizonte sodificado conocido como nátrico”.

La actividad antrópica puede producir acumulación superficial de las sales de diversas formas, por ejemplo, la construcción de estructuras o almacenamiento de aguas para riego, como canales o reservorios, pueden generar salinización en área aledaña a ellos, sobre todo si estas cruzan por estratos ricos en sales o conducen y almacenan agua salina. En áreas donde se maneja la agricultura intensiva con fertilización y riego abundante, las aguas subterráneas contienen altas concentraciones de sales consecuencia de la lixiviación natural del agua a través del perfil y el lavado del suelo, estas pueden retornar a la superficie. Así mismo, a medida que el agua se evapora, las sales se concentran en el suelo en altas cantidades. Por su parte, la actividad industrial produce concentraciones considerables de

nitrógeno y azufre, incrementando entonces la cantidad de sales añadidas en el suelo que se encuentra dentro del área de influencia de la actividad, obra o proyecto industrial (Amézquita et al., 2001).

En cuanto a las propiedades edáficas químicas, por la concentración de los iones sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) se produce interferencia en la absorción de nutrientes por lo que se impide su captación y se alcanzan niveles tóxicos para el metabolismo celular de las plantas (Courel, 2019).

En lo que concierne a la sodicidad, los efectos sobre las propiedades edáficas físicas, principalmente se da la existencia de la doble capa eléctrica expandida debido a los efectos de valencia y elevado radio hidratado del ion Na^+ , produciendo dispersión y no se permite la formación de agregados, por lo que no se genera la estructura y al faltar porosidad en el suelo el movimiento del agua es muy lento y la conductividad hidráulica muy baja. Si se cuenta con la presencia de texturas moderadamente finas a finas, en la superficie se generan estructuras de tipo laminar lo que afecta la emergencia del cultivo (Courel, 2019).

Por su parte, las propiedades edáficas químicas se ven afectadas por la sodicidad, ya que estas sales de elevada solubilidad incrementan en el pH a valores superiores o iguales a 8,5, dificultando la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica en los suelos. Estos suelos generalmente presentan en la superficie “costras negras”, estos son “humatos sódicos producto de la unión de la materia orgánica coloidal con el sodio presente. Estas costras negras son identificadas con facilidad sobre la superficie del suelo, permitiendo reconocer la problemática a simple vista” (Courel, 2019).

Los procesos de recuperación del suelo, son procesos específicos para cada caso puesto que dependen de factores característicos del suelo (textura y estructura), origen de la salinidad, geología, topografía, uso y vocación del suelo, limitaciones debidas al tiempo y suplemento de agua (Amézquita et al., 2001).

En cuanto a las prácticas de manejo de suelos salinos se sabe que en procesos agrícolas bajo riego y en climas áridos y semiáridos las plantas crecen en condiciones frágiles con su hábitat, estas condiciones son particularmente sensibles a los desbalances que provocan la actividad humana. Es por ello, que se requiere la existencia del balance en la relación agua-suelo-planta, y en el manejo de sus componentes, como lo es el caso de las sales en el suelo para no aumentar las condiciones de estrés a las que están sometidas las plantas en estos ambientes (Amézquita et al., 2001).

Los sistemas de manejo integral hacen uso de las siguientes prácticas de manejo de suelos que permiten disminuir o corregir la acumulación de sales, estos son: nivelación, labranza profunda, labranza mínima, adición de materia orgánica, preparación de surcos y camas para semillas. En cuanto a las prácticas adicionales sobre el manejo de agua, como lo menciona Amézquita et al. (2001), se debe tener en cuenta que:

- Las sales se acumulan en la superficie o cerca de ella como resultado de la evaporación y subsiguiente ascenso capilar del agua
- Las sales se mueven con el agua en el suelo y se acumulan en el frente húmedo.
- Los periodos más críticos y cuando es más importante tener un control estricto del problema salino son la germinación de la semilla y la emergencia de las plántulas.

Ahora bien, es importante señalar en este apartado que el cultivo de rosa en condiciones de invernadero, el suelo debe prepararse con buen drenaje y aireado con el fin de evitar encharcamientos, aquellos suelos que no cumplen con estas condiciones hacen uso de materiales orgánicos con el fin de mejorarse la calidad, adicionalmente aunque las rosas toleran suelos ácidos, el pH debe mantenerse entre 5,5 y 7, teniendo mejores resultados de producción en pH entre 6 y 6,5, puesto que esta especie vegetal no tolera niveles elevados de calcio ni de sales solubles, por lo que se recomienda no superar el 0,15% de sales. Adicionalmente se debe llevar a cabo la desinfección del suelo con calor y otro tratamiento que responda a las exigencias del cultivo (Infoagro Systems S.L., 2010).

Adicionalmente, en caso de que el pH del suelo se encuentre por debajo de los valores ideales anteriormente mencionados, se agrega cal con el fin de aumentar el pH y el suelo no se considere ácido, si, por el contrario, el suelo es muy alcalino se agrega azufre con el fin de reducir este nivel de pH, por lo anterior, es necesario mencionar que según FAO (2020) cuando se presenta un pH altos, las sales son más solubles en el agua, indicando de esta manera que haya presencia entre más alto se presente. También es importante resaltar que se requiere un equilibrio entre la materia inorgánica (arena, limo, arcilla) y la orgánica (bacterias, raíces, compost, entre otros) del suelo. Cuando el aporte de la M.I contribuye a mejorar la circulación del aire, las raíces de la planta pueden tomar oxígeno reflejándose en su adecuado crecimiento y desarrollo, mientras que el aporte de la M.O es incorporar en el suelo los nutrientes necesarios para el desarrollo del cultivo (Ruben, 2016).

El grado de salinidad indica el nivel o estado de las sales en los suelos, para esto se utilizan los indicadores pH, C.E, SB. Estableciendo entonces cinco grados de menor a mayor relación con la degradación de las funciones y servicios que proveen los suelos:

Tabla 1
Grados de Salinidad CAR

Grado	Conductividad eléctrica (dS/m)	pH	Características
Muy ligero	<2	5,6 - 6,6 (Saturaciones de bases <50%) 3,5 – 5,5 (Cualquier saturación de bases)	<ul style="list-style-type: none"> • El contenido de cationes está normalmente desaturado y/o dominado usualmente por el aluminio y el hidrógeno. • Cantidad de cationes y aniones suelen ser muy bajas.
Ligero	2 – 4	5,6 - 6,6 (Saturaciones de bases entre el 50 y el 75%) 6,6 - 7,4 (Saturaciones de bases <50%)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo contenido de aluminio intercambiable • Bajas concentraciones tanto de cationes como de aniones, esperándose de esta forma la conductividad eléctrica sea menor a 4 dS/m.
Moderado	4 – 8	6,6 – 7,9 (Saturación de bases >50%)	<ul style="list-style-type: none"> • El desarrollo vegetal se ve afectado y por tanto la productividad, así como las funciones y servicios ecosistémicos de los suelos. • Los suelos comienzan a tener presencia de algas, costras o manchas de sales y en algunos casos plantas indicadoras de salinidad.
Severo	8 – 16	7,4 – 8,4 (Saturación de bases >75%)	<ul style="list-style-type: none"> • Se restringe el crecimiento vegetal y afectan la productividad de biomasa y de los cultivos. <ul style="list-style-type: none"> • Las funciones y servicios ecosistémicos se ven fuertemente afectados. • Los indicadores visuales como plantas halófitas, y costras de sales son más abundantes y más comunes durante gran parte del año.
Muy severo	>16	>7,9 (Saturación de bases >75%)*	<ul style="list-style-type: none"> • Estados de salinidad de suelo más críticos en términos de productividad. • Las condiciones de vida son tan escasas que es evidente el proceso de desertificación.

*También se incluyen los suelos sulfato ácidos donde el pH es muy bajo (en general inferior a 4,0).

Nota: Esta tabla muestra los grados de salinidad del suelo según las características fisicoquímicas del mismo establecidos por la Corporación Autónoma de Cundinamarca (Clavijo Rios et al., 2018)

La tabla anterior permite tener de manera ágil y resumida las características principales que se pueden evidenciar en las plantas de acuerdo con su nivel de salinidad, de igual manera deja claro que incluso entre cada rango las características visuales pueden variar y por tanto justifica un estudio más detallado.

7.2.3 Fisiología vegetal

Ahora bien, ya conocido el proceso de salinización de los suelos, es necesario abordar la fisiología vegetal de las plantas vasculares, siendo relevante para este proyecto puesto que conociendo cómo funcionan las plantas y sus procesos vitales que permiten el transporte interno de nutrientes y del agua y cómo se lleva a cabo la interacción suelo-agua-planta-aire, se puede entender la propuesta de Swallow & O'Sullivan y por qué se dieron los resultados presentados más adelante.

En primer lugar, una planta vascular, es aquella que posee definidamente raíces, tallo, hojas y flores, se pueden diferenciar de las no vasculares debido a que sus diferentes partes ya mencionadas, tienen distintos tipos de tejidos y funciones, como se aprecia en la figura 6. Por último, se destaca la presencia de pequeños conductos que recorren desde las raíces hasta las hojas para el transporte de savia; estos conductos reciben el nombre de xilema y floema con sus respectivas funciones. El xilema permite la absorción de la savia bruta (conformada de agua y sales minerales) desde el suelo hasta la raíz, y el floema es el encargado de transportar la savia elaborada desde las hojas hacia el resto de la planta (Taiz & Zeiger, 2003)

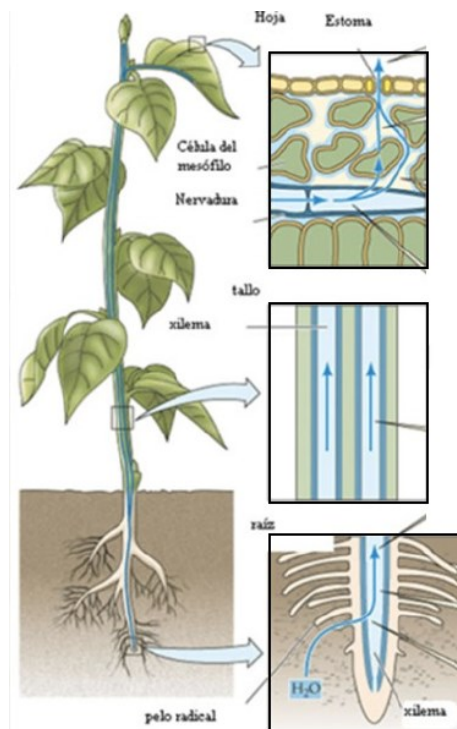


Figura 6. Resumen de la teoría. (Hernández Gil, 2002).

En las plantas, el paso del agua es un proceso pasivo dividido en flujo masivo y difusión: el primero de estos es el movimiento de agua y solutos en una sola dirección por diferencia de presiones, logrando mover el agua largas distancias como desde las raíces hasta las hojas, midiéndose en metros por hora. Por su parte, la difusión es el movimiento de agua de manera descontrolada por diferencia de concentraciones de solutos, indicando proceso de ósmosis. Este está encargado de mover cortas distancias como entre células o entre el suelo y la planta, midiéndose en metros por año (Bidwell, 1990).

El agua es aquello que ejerce potencial gracias al dominio de un gradiente, pero su movimiento se dificulta por diversas resistencias al flujo en donde se incluyen la viscosidad en la solución, la permeabilidad de las membranas y la resistencia al flujo en los pasajes estrechos. Así pues, los potenciales de agua y por ende las tasas de flujo, son directamente proporcionales a las condiciones de irrigación, que afectan los potenciales de agua del suelo, y a las condiciones atmosféricas, que afectan el potencial de agua del aire (Bidwell, 1990).

Otro concepto primordial es el efecto de capilaridad, que radica en que los fluidos se desplacen a través de conductos capilares dependiendo de la tensión superficial y la cohesión de dichos fluidos. Este efecto trae su importancia ya que se sabe que la planta está formada en un 80% por agua, haciendo una analogía que la fisiología es el estudio de las relaciones hídricas (Taiz & Zeiger, 2003).

Estructura y procesos vegetales

Al revisar a profundidad la estructura interna vegetal y procesos que se desarrollan dentro de la planta es posible percibir ciertas características de los tejidos que la conforman:

Muchas de las membranas que rodean los organelos se caracterizan por presentar una permeabilidad diferencial, es decir, el agua atraviesa dichas membranas con bastante facilidad y aquellas sustancias disueltas no logran pasar tan fácilmente o pasan lentamente, generándose una resistencia por aquellas membranas. En efecto contrario, existen algunas membranas de carácter semipermeables que sí generan un paso restringido a la mayoría de las sustancias. Sin embargo, la mayoría encuentran su funcionalidad respecto a la permeabilidad. Así mismo, el potencial osmótico y el potencial de presión, tienen relación directa en que, si se presenta una disminución de estos, proporcionalmente se presenta una disminución de energía (Bidwell, 1990).

El movimiento del agua que se encuentra presente en las células tanto de salida como de entrada está dado es gran medida por el potencial hídrico presente entre células, determinando al mismo tiempo el movimiento y la fuerza con la que se mueve el agua en cada célula. Este potencial hídrico está fijado por la imbibición, este es el movimiento de un fluido viscoso dentro de otro sin mezclarse, así este proceso está activamente implicado en la absorción de agua bajo ciertas circunstancias, moviendo el agua de un área de alto potencial a otro de bajo potencial sin ayuda de una membrana diferencialmente permeable (Bidwell, 1990).

Teniendo en cuenta lo anterior, es fácil indicar que el agua se mueve bajo la influencia de la imbibición y que el potencial hídrico suele estar afectado por tales fuerzas. El potencial mátrico es usado para calcular todas las fuerzas que causan la imbibición o retienen el agua en cualquier tipo de matriz. Por lo cual, el potencial mátrico puede definirse como un componente del potencial hídrico que se debe a la interacción del agua con los capilares en moléculas grandes, en otras palabras, la inclusión de la

atracción capilar y las fuerzas intermoleculares que fijan agua de hidratación en los coloides del suelo (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Bidwell, 1990).

Ahora bien, el agua es una molécula polar y forma puentes de hidrógeno ocasionando que se dé un aumento en las temperaturas de fusión y ebullición. En adición a lo anterior, estos puentes de hidrógeno permiten que se presente el efecto cohesión, efecto que ayuda a que las moléculas de agua permanezcan unidas, estableciendo que para que haya una ruptura de dichos puentes sea necesario el uso de bastante energía (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

Ahora bien, el agua a nivel de actividad dentro de la planta se puede destacar que ésta solo utiliza el 0,01% del agua absorbida para el proceso de fotosíntesis. La demás se usa para las reacciones bioquímicas como el movimiento de solutos para la distribución de nutrientes a lo largo de la estructura de la planta. Estas sustancias como el agua y azúcar son almacenadas al interior del organelo vacuola, creando una alta concentración dentro de la célula. Este proceso se traduce en que se presente el efecto responsable de mantener la planta de pie, la turgencia, proceso que crea una presión sobre la pared celular de la vacuola por la entrada de agua sin altas concentraciones, indicando que se dé el proceso de ósmosis, donde el agua con baja concentración tiende a dirigirse a la de mayor concentración dentro de la célula. En este orden de ideas, se puede especificar que Turgencia = Hipotónico = Osmótico (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

En cuanto a las problemáticas relacionadas con el agua, en primera instancia, se interpone el término de plasmólisis, que es aquel proceso que ocurre cuando se da una disminución del protoplasto, los plasmodesmos se rompen y se separa la pared celular. Cabe aclarar que esto se puede generar por la presencia de una alta salinidad (Taiz & Zeiger, 2003)

Se debe saber sobre el movimiento del agua:

- Las plantas terrestres necesitan sistemas eficientes para absorber y movilizar el agua, puesto que su nutrición fundamental es gaseosa y poseen un sistema de intercambio gaseoso muy eficaz. El agua perdida debe recobrase constantemente por absorción y transporte desde el suelo (Taiz & Zeiger, 2003)
- Entrada del agua a las células: El agua entra a las células por ósmosis, es decir por movimiento en favor de un gradiente potencial.
- La presión de la raíz: La presión radical es parte de las fuerzas que movilizan el agua desde las raíces a la porción aérea de la planta. Si bien esta presión es insuficiente para mover el agua hasta la copa de los árboles grandes, puede intervenir en el ascenso de la savia de ciertas especies (Taiz & Zeiger, 2003).

Para resumir lo anterior, el agua se mueve por la planta, penetrando principalmente por las raíces y saliendo por las hojas, respondiendo a un gradiente de potencial, el cual disminuye continuamente desde el suelo hacia la atmósfera. Por ende, la planta actúa como eslabón en el sistema hídrico al permitir el flujo del agua hacia abajo de un gradiente de potencial; desde el suelo a la atmósfera, parte del movimiento es mediante ósmosis, y otra parte mediante flujo de masa.

A continuación, se explicará cómo se mueve el agua a través de la planta y la atmósfera:

Atmósfera:

El movimiento del agua al llegar a las hojas y cuando se presenta un aumento en la temperatura de estas y del aire, aumenta proporcionalmente la transpiración. Al mismo tiempo, los estomas se abren para que se provea un intercambio de gases entre el exterior y la planta, en otras palabras, una transpiración estomática (Azcón-Bieto & Talón, 2013)

Cuando se aplica una tensión desde la parte superior de las traqueidas xilemáticas, se hace con el fin de transmitir esa tensión a la columna de agua sin afectar el contacto con la pared del tubo capilar. Asimismo, esa tensión puede ser inducida debido a la transpiración que se crea en las columnas del xilema, ayudando a que se produzca este proceso de ascensión del agua por medio de la capilaridad y contrarrestando el efecto hidrostático de la gravedad. El agua presenta una mayor cohesión cuando pasa a través del estrecho diámetro de los conductos capilares y se necesita de una excesiva tensión para que no genere un efecto de cavitación (efecto hidrodinámico al vacío). Concluyendo entonces que la arquitectura del sistema vascular es compatible con las fuerzas requeridas para el transporte de agua (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

En lo que se refiere a la absorción y transferencia de solutos: los solutos se movilizan por dos métodos, difusión (mediante canales que muestran barreras físicas) o fuerzas de arrastre de solvente (donde son arrastrados por el flujo del solvente), sin embargo, cuando una barrera física interrumpe su libre paso, cómo hace una membrana o una materia coloidal, se actúan diversos mecanismos para realizar esta transferencia o movilización, ya que sin su completa realización la solución atraviesa o los componentes difunden a través de esta (Bidwell, 1990).

La energía al interior de la planta, al abarcar este tema es indispensable poner en contexto cómo funciona la energía dentro del sistema determinando como eje principal: el agua a través de la célula. El concepto de potencial hídrico que estipula que el agua se mueve a favor de un gradiente, variación o cambio, cediendo a su vez energía, pero como en todo sistema que tiende hacia el equilibrio, es importante mencionar que el agua tiende de igual forma a desplazarse hacia una región con una menor tasa de energía. La energía mencionada también se puede conocer como energía libre o energía disponible para realizar todo el proceso de funcionamiento (Bidwell, 1990).

La respiración salina es otro fenómeno del cual es ineludible no tomar a disposición cuando se habla de un gasto energético por parte de la planta en cuestión, ya que cuando las raíces absorben altas tasas de iones de sal, aumenta la respiración de la planta. Así, se genera un incremento de respiración superior al normal, ya que la planta debe gastar más energía en pro de realizar el proceso de metabolización de los iones en el transporte activo, con el fin de que la planta siga utilizando energía a pesar de haber acabado y sido removidas las sales. El transporte activo se traduce en la transferencia de iones o moléculas que van en oposición a los efectos de difusión y el equilibrio químico. Los solutos transportados pasaran mediante la membrana por el efecto de osmosis (Bidwell, 1990).

Para este proyecto también es necesario conocer que la nutrición en las plantas está dividida en macro y micronutrientes:

El papel principal de los macronutrientes es desempeñar características de electroquímicos, estructurales y catalíticos. El primero, crea un equilibrio de las concentraciones iónicas, la estabilización de macromoléculas y neutralización de cargas. El segundo, interviene en la estructura

química de las moléculas biológicas o las utilizadas en la síntesis de los polímeros estructurales. Y el tercero, ayuda en la activación de las enzimas. Por otra parte los micronutrientes son importantes debido al correcto funcionamiento de las reacciones químicas al interior de la planta y su facilidad para que se lleven a cabo los procesos (Bidwell, 1990).

Entre los principales macronutrientes se encuentra el calcio, elemento que abunda en la mayoría de los suelos, y las plantas raramente muestran su deficiencia en condiciones naturales. No obstante, las posibles altas concentraciones tienden a precipitar bastantes sustancias al interior de la planta y dejarían de impedir los efectos tóxicos que pueden efectuar otras sales en exceso (Bidwell, 1990).

Lo que refiere a elementos benéficos son de gran utilidad para el crecimiento y procesos propios de las plantas. Entre ellos hay que destacar el sodio, como uno de los principales precursores para las plantas halófitas en su proceso de crecimiento en aguas salobres, como en los manglares. Al cumplir y finalizar el ciclo del Sodio en la planta, este es nuevamente desechado por transporte activo hacia las hojas (Bidwell, 1990).

7.3 *Marco normativo*

El presente proyecto se enmarca dentro del Decreto/Ley 2811 de 1974 *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*, teniendo en cuenta que el primero de sus objetivos es “lograr la preservación y restauración del ambiente, la conservación, mejoramiento y uso racional de los recursos naturales renovables..., la disponibilidad permanente de éstos...”, adicionalmente se resaltan los artículos 3, 5 y 8 que especifican la regulación sobre el componente suelo (Congreso de la Republica, 2004)

También se tiene en cuenta el Decreto 1076 de 2015 *Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible* (MADS, 2015), especificando la sección 18, Artículo 2.2.1.1.18.6 que especifica la protección y conservación de suelos por el propietario del predio, donde se obliga a:

1. Usar el suelo de acuerdo a sus condiciones y factores constitutivos manteniendo su integridad física y su capacidad de producción de acuerdo a la clasificación agrológica del IGAC y respectivas recomendaciones
2. Proteger los suelos mediante técnicas adecuadas de cultivos y manejo de suelos, que eviten la salinización y en general la pérdida o degradación de los suelos

Es necesario aclarar que, aunque las demás obligaciones son importantes en el marco jurídico del sector agropecuario, no reúnen los argumentos necesarios para señalarlos en este apartado.

Los decretos anteriormente mencionados se acompañan de la *Política para la Gestión Sostenible del Suelo* expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2016, donde se reconoce la salinización como proceso de degradación del suelo que pone en riesgo la producción de alimentos, filtro e intercambio de gases, regulación hídrica y climática, entre otros servicios ecosistémicos que ofrece este sistema dinámico, por lo que con la política se busca promover el manejo sostenible de los suelos del país, donde converjan la conservación de los recursos, el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, propendiendo y contribuyendo al desarrollo sostenible y el bienestar de la población (MinAmbiente, 2016).

Por último la presente investigación se enmarca en el programa *ruta de sostenibilidad* de Asocolflores, teniendo en cuenta que el objeto de estudio del presente son tres cultivos de rosa acogidos a esta asociación y a su normatividad, por lo cual, en la mencionada ruta se busca la implementación de buenas prácticas a nivel ambiental, social y de calidad, fortaleciendo la gestión empresarial de los floricultores hacia la sostenibilidad y la competitividad (Asocolflores, 2020)

Los decretos, política y programa anteriormente resaltados, enmarcan legalmente el proyecto ya que no solo busca la protección y conservación del recurso suelo, sino que además se integran las nuevas tecnologías a la sostenibilidad partiendo desde una perspectiva holística que abarca al hombre, la economía y el ambiente.

7.4 Marco geográfico

Para iniciar con la descripción del presente estudio en la *figura 7* se observa en el recuadro el mapa de Colombia resaltado en rojo el departamento de Cundinamarca, figura ampliada sobresaliendo también en rojo la sabana de Bogotá.



Figura 7. Mapa ubicación de la Sabana de Bogotá. (Gobernación de Cundinamarca, 2006)

La Sabana de Bogotá, se ubica en el centro geográfico de Colombia, esta sabana es la altiplanicie más extensa de la Cordillera Oriental de los Andes, se encuentra a más de 2600 msnm. Los municipios que conforman esta sabana además de Bogotá D.C son Mosquera, Madrid, Funza, Facatativá, Subachoque, El Rosal, Tabio, Tenjo, Cota, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tocancipá, Cogua, Nemocón, Sibaté, Soacha, Sopó, Gachancipá, Sesquilé, Chocontá, Cucunubá y Guatavita (Somos Cundinamarca, 2012); enfocándose esta investigación en los municipios de Sopó, Tenjo y Tocancipá como se observa en la *Figura 8*.

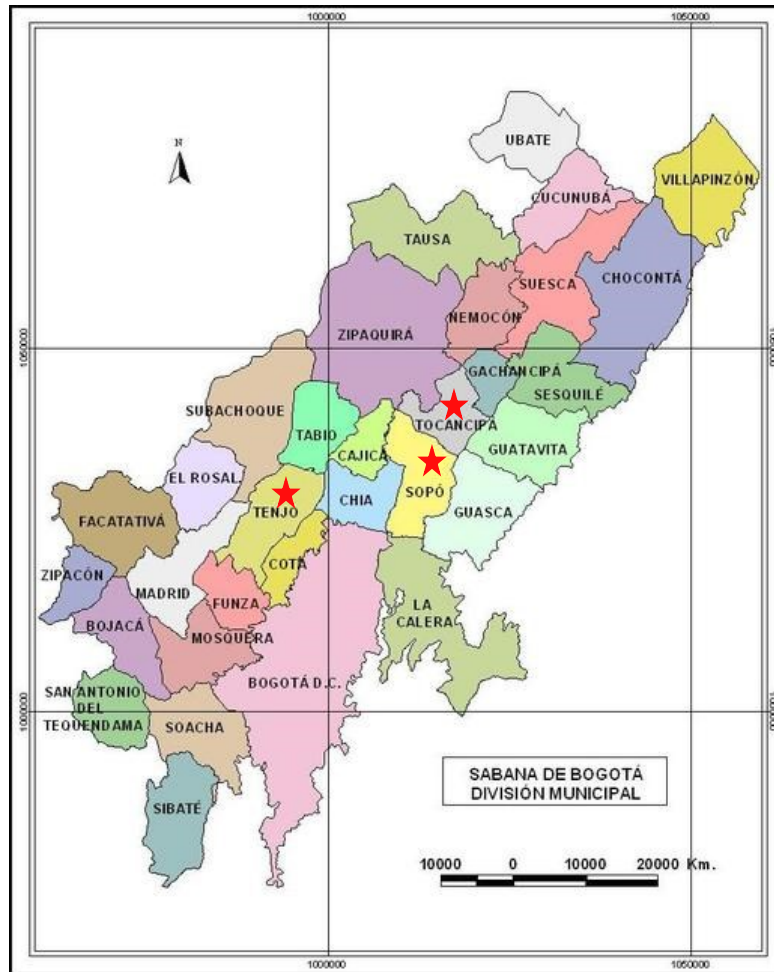


Figura 8. Ubicación de municipios zona de influencia. Somos Cundinamarca (2012)

En la Sabana de Bogotá “se presentan cuatro tipos de clima diferentes, que van entre el ligeramente húmedo, húmedo y moderadamente húmedo, hasta el semihúmedo, siendo este último el que corresponde a las zonas subxerofíticas, en el cual además la temperatura media anual oscila entre los 12°C y 14°C, siendo 13°C la temperatura media anual en general en toda la Sabana.” (Calvachi-Zambrano, 2012). La precipitación promedio anual es de 400 a 900 mm, con mayor presencia de lluvias en el primer semestre del año, la humedad relativa es de 55 a 80% (Cádenas Poveda & Rodríguez Espejo, 2011).

Los suelos recolectados para la ejecución de este proyecto son de tres empresas floricultoras dedicadas a la producción de rosa bajo cubierta de invernadero, ubicadas específicamente en los municipios de Tocancipá (4°58'1"N, 73°55'1"O), Tenjo (4°52'1"N, 74°9'0"O) y Sopó (4°54'34"N, 73°56'27"O), todos pertenecientes al departamento de Cundinamarca.

Nota aclaratoria: Por proteger la solicitud de reserva de la razón social de los tres cultivos, se van a mencionar en adelante con el nombre del municipio al cual pertenece cada muestra.

El municipio de Tenjo tiene una superficie de 117 Km², cuenta con temperatura variable entre los 7 y 19°C, rara vez baja a 3°C o sube sobre los 22°C. Este municipio tenía una población conocida para 2018 de 20179 habitantes. En la economía la agricultura ocupa el 6,14% según la clasificación de actividades productivas (DNP, 2018b)

Por su parte, el municipio de Tocancipá cuenta con una superficie de 72Km², la temperatura varía entre los 7 a los 19°C, al igual que el municipio anterior, rara vez baja a menos de 3°C y sube sobre los 21°C; para 2018 se conocía una población de 34554 habitantes y la agricultura ocupa el 1,52% de la economía municipal (DNP, 2018c).

Por último, el municipio de Sopó tiene una superficie de 113 Km², con temperatura variable entre 6 y 19°C, rara vez desciende a menos de 2°C y sube sobre los 21°C. A 2018 se conocía una población total de 28518 habitantes y el 2,07% de la economía la ocupaba la agricultura (DNP, 2018a).

El tipo de suelo presente en la Sabana de Bogotá es reciente, de edad cuaternaria (Geotecnia, 2020), por lo que es importante resaltar los principales órdenes de taxonomía de suelos en la zona de estudio en el Departamento de Cundinamarca para mejorar el contexto de las zonas de toma de muestra y dar un mejor acercamiento a los análisis de las muestras escogidas. Según el informe “Levantamiento Detallado de Suelos en las Áreas Planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá” suministrado por el IGAC en el 2012, establece que para la Sabana de Bogotá están presentes los órdenes con su respectivo valor porcentual: Inceptisoles (62,8%), Andisoles (26,8%), Alfisoles (6,7%), Molisoles (1,8%) y Entisoles (1,8%) (Ministerio de Vivienda & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2012).

Estos suelos son derivados de cenizas volcánicas, pertenecientes a la serie Techo, provenientes de las erupciones volcánicas de la Cordillera Central transportadas por el aire hasta la Sabana de Bogotá (Cádenas Poveda & Rodríguez Espejo, 2011). Estos suelos son formados a partir de limos arcillosos de la planicie aluviolacustre, pobremente drenados por la presencia de un horizonte compactos (claypan), conservando poco humus, que en parte migra hacia el nivel inferior del suelo, son suelos con pH entre 5 a 5,5, fertilidad natural moderada, por lo que presentan limitantes para los cultivos (Calvachi Zambrano, 2012).

Dando pie de partida que los Inceptisoles tienen poco grado de desarrollo con características de cenizas volcánicas meteorizadas al igual de los Andisoles, que estos a su vez presentan rasgos de color oscuro debido a la alta materia orgánica. Con lo que respecta a los Andisoles y Alfisoles su evolución es moderada. Adicionalmente, se estima que para esta zona existe un 29,6% se dan en un régimen de humedad ácuico perteneciente en su mayoría al orden Inceptisol. Por otro lado, el 47,6% presenta una humedad óptima a través del año, es decir, un régimen de humedad údico y estos están presentes en la clasificación de los órdenes Inceptisol y Andisol. Por último, el 22,8% faltante se exhiben condiciones de humedad durante un semestre y de sequedad en el otro, lo cual significa que el régimen de humedad que prevalece es el ústico; dando especificidad que bajo estas condiciones de humedad se han desarrollado los suelos del orden Alfisol y un porcentaje alto de los del orden Inceptisol (Ministerio de Vivienda & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2012).

Cabe resaltar entonces que las cenizas volcánicas mencionadas se descomponen y al mezclarse con el humus de la vegetación, forman una capa de suelo oscuro de 50 a 150cm de espesor, de gran fertilidad

conocido como andisol. Los cultivos de flores de corte requieren suelos que presenten un pH entre 6 y 6.8 para denominarse como aptos para producción de rosa para exportación (Cádenas Poveda & Rodríguez Espejo, 2011).

Para terminar es importante resaltar que dentro de los porcentajes dedicados a la agricultura de cada municipio se encuentran los cultivos de rosa objetos de estudio para la presente investigación, por ello también es importante conocer que para 2010 el DANE reportó que el sector floricultor contaba con 7290 Ha. cultivadas dedicadas a la producción de flor para exportación, de estas hectáreas, el 79% se encontraba en la Sabana de Bogotá, seguida por el departamento de Antioquia y otros departamentos del país, generando entonces alrededor de 95000 empleos directos y 80000 indirectos, con un 60% de mujeres del total de trabajadores (DANE, 2010).

7.5 Marco institucional

En este apartado de marco institucional, se exponen las instituciones que tuvieron estrecha relación en la realización de esta propuesta y que pueden inferir en su puesta en marcha a gran escala.

- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible



Figura 9. Ministerio de Ambiente.

- Corporaciones Autónomas Regionales



Figura 10. Corporación autónoma Regional.

- IDEAM



Figura 11. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IGAC



Figura 12. Instituto geográfico Agustín Codazzi.

- Universidad El Bosque



Figura 13. Universidad El Bosque.

8 Metodología

Con el objetivo de evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo se tomó como base del estudio la metodología propuesta por (Swallow & O’Sullivan, 2019) del artículo “*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*” realizando ajustes en los respectivos protocolos adaptando a las condiciones controladas del presente estudio.

El plan de trabajo está dividido por actividades mensuales que corresponden a cada objetivo específico, con su respectivo costo y responsable. Obsérvese Anexo 3. Adicionalmente, se encuentra el presupuesto estimado para la realización del proyecto. Obsérvese Anexo 4, dicho plan de trabajo se encuentra igualmente resumido en la *figura 14* a continuación:

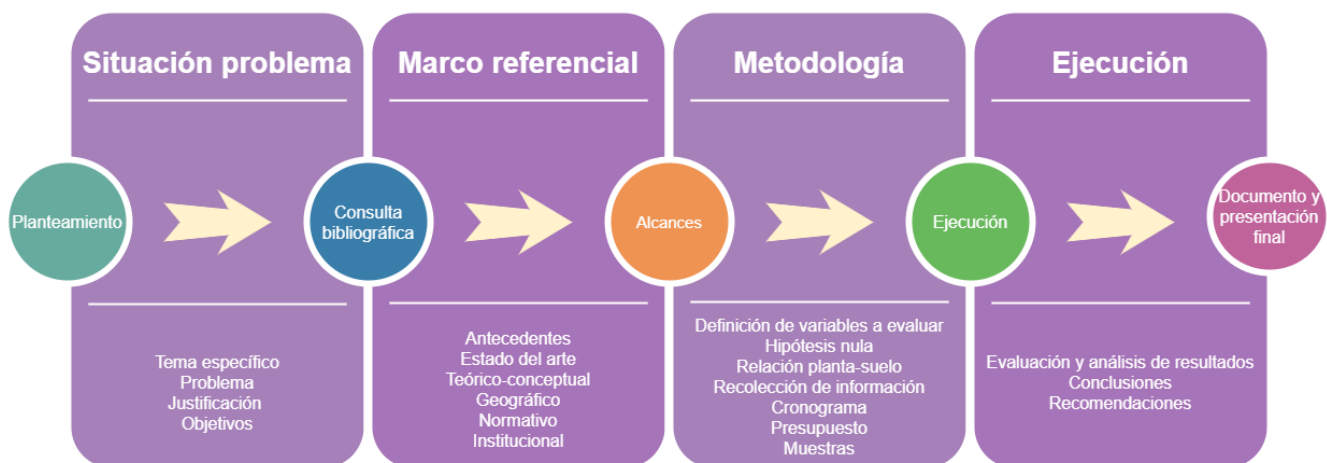


Figura 14. Secuencia metodológica de investigación
Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se observa cómo se diseñó cada fase del trabajo, teniendo en cuenta como punto de partida el planteamiento del problema donde se especificó la temática a tratar, el problema, la justificación y los objetivos a los cuales se deseaba llegar, a continuación, se generó el marco referencial expuesto en los apartados anteriores por medio de la consulta bibliográfica. A partir de esto, se ajustó la metodología teniendo en cuenta los alcances a los que podía llegar la investigación, luego se establecieron los indicadores edafológicos de salinidad a evaluar, las hipótesis que se deseaban descartar y aceptar y los detalles a tener en cuenta; en función de esto, se ejecutó la metodología generada y se realizó la evaluación final de los datos con el propósito de exponer los más importantes y presentar las conclusiones más relevantes de la monografía. A continuación, se especifican los apartados de la metodología producida:

8.1 Método:

El enfoque fue mixto dado que el Proyecto se caracterizó por los análisis estadísticos y de laboratorio que sustentan la parte cuantitativa; por su parte el método cualitativo se sustenta con los documentos consultados para la ejecución además de las observaciones cualitativas utilizadas en la redacción de las bitácoras de campo.

8.2 Enfoque:

El modelo de enfoque en este proyecto fue multimodal, ya que integró el enfoque cuantitativo y cualitativo. Por un lado, la orientación cualitativa, se utilizó para definir la metodología, las variables a evaluar y así se pudo precisar la situación ideal de aplicación de la propuesta.

Por otro lado, se abordó el enfoque cuantitativo porque a través de la recolección de información proveniente de análisis de laboratorio, muestreo y aplicación, además del análisis estadístico para confirmar y comparar los resultados, teniendo en cuenta la predicción y tendencias que se presentaron, con el fin de probar la eficiencia del proyecto, estableciendo el costo-beneficio ambiental de este para su aplicación en cultivos de rosa bajo cubierta de invernadero en la Sabana de Bogotá a gran escala, y como línea base de futuros proyectos en esta área de investigación para su posible aplicación a nivel nacional en suelos con otra vocación y uso.

8.3 Alcance:

El presente proyecto se planteó como una investigación exploratoria, englobando la investigación descriptiva, correlacional y explicativa; esto se debe, principalmente a la baja existencia teórica encontrada frente a los antecedentes, pues no se han establecido metodologías que apliquen biomímesis de plantas vasculares a la desalinización de los suelos. En la revisión de la literatura se encontraron pocas ideas relacionadas con la problemática de estudio, no obstante, se cuenta con investigaciones que se acercan vagamente al tema, por lo que al saber cómo se realizan los procesos y cómo se hace esta simulación, se permitió realizar esta propuesta.

Adicionalmente, se relacionaron estudios realizados en suelos salinos no solo en Colombia sino en otras partes del mundo, tales como Bolivia, Canadá, Turquía y otros, donde a partir de diferentes metodologías aplicadas, se propuso la recuperación de estos suelos teniendo en cuenta los servicios ecosistémicos que estos proveen y la importancia a nivel económico y social que implica su enmienda. Esta propuesta contiene entonces, la explicación del proceso de simulación basado en la capilaridad de las plantas vasculares y cómo este nuevo protocolo puede aplicarse en el país, pues la salinización como se ha mencionado previamente a lo largo del documento es un problema que aqueja no solo una población específica sino a nivel mundial.

Este proyecto se enmarcó dentro de una de las áreas de la ingeniería, que aunque conocida, poco se ha abordado, específicamente la biomimesis para la remediación de suelos salinos, aportando entonces una nueva perspectiva para el manejo y metodologías que se aplican actualmente en Colombia.

8.4 Técnica-Instrumento:

Principalmente, se establecieron las variables a evaluar en el suelo para verificar la ejecución del proceso de capilaridad y desalinización, para esto también se ajustó la metodología propuesta por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G. (2019) “*Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation*”, adecuándola entonces a las condiciones encontradas en el sitio de aplicación de este proyecto, pues se entiende que el suelo se encuentra en constantes dinámicas y de esto también depende el éxito del proceso de remediación. Es por ello que se utilizó como técnica el análisis del modelo de las pruebas preliminares y la simulación del montaje para las mediciones del prototipo, los análisis de laboratorio y análisis de información tanto bibliográfica como estadística.

Por su parte, los instrumentos utilizados fueron las diferentes muestras de suelo problema (Tocancipá y Tenjo) y una muestra blanco (Sopó) para tener un comparativo, el laboratorio de análisis de muestras, la bitácora experimental realizada en campo, los materiales utilizados descritos a continuación y la información bibliográfica encontrada. A continuación, se visualiza la matriz de variables que responden por componente al objetivo general planteado para este proyecto, cabe resaltar que no se realizó por objetivo específico ya que de este modo se pierde el hilo conductor de la presente investigación.

Tabla 2
Matriz de variables

Objetivo general	Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Técnica	Instrumento
Evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo.	Ecológica	Muestra de suelo salino de cultivo de rosa 1. Tocancipá 2. Tenjo	Características fisicoquímicas del suelo	Textura	1. Análisis de laboratorio 2. Búsqueda bibliográfica	1. Muestreo 2. Laboratorio
				pH		
		Material absorbente	Efectividad de absorción y retención de sales	Conductividad eléctrica	1. Ensayos preliminares 2. Búsqueda bibliográfica	1. Pruebas de material 2. Bitácora
				PSI		
Económico	Costos	Materiales Laboratorios Estadísticas		RAS	Análisis de información	1. Recibos 2. Búsqueda inicial de costos (Presupuesto)
				CIC		
				% Saturación agua		
Social	Aceptación de proyecto	Agricultores con suelos salinos	Efectividad de propuesta	Sulfatos	1. Análisis, conclusiones y recomendaciones de investigación 2. Réplica a pequeña, mediana y gran escala	Proyecto de investigación
				Cloruros		
				Carbonatos		
				Bicarbonato		
				Relaciones catiónicas		

Nota: Esta tabla evidencia las variables, aspectos, indicadores, técnicas e instrumentos que se tuvieron en cuenta en cada dimensión de sostenibilidad en la ejecución de este proyecto

Para precisar los aspectos anteriormente mencionados se visualiza la matriz metodológica que expone los ítems descritos y da la idea general de lo realizado en el proyecto

Tabla 3
Matriz metodológica

Enfoque	Multimodal (Cuantitativo y cualitativo)		Técnica	Prototipo (Montaje) Análisis de indicadores de salinidad		Método	Basado en "Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation" propuesta por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G	
Alcance	Investigación exploratoria (Descriptivo, correlacional, explicativo)		Instrumento	Muestras de suelo Laboratorios certificados				
Objetivo General	Objetivos específicos	Actividades	Enfoque	Alcance exploratorio	Método	Resultados esperados		
Evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tenjo - Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo.	Seleccionar los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo.	Consulta bibliográfica				Se espera consignar el mayor número de artículos bibliográficos referentes al tema de investigación.		
		Indagar los cultivos de rosa que tengan suelos salinos en la Sabana de Bogotá				Localizar tres cultivos de rosa, dos de ellos que tengan problemas de salinidad en los suelos para ser tomados como muestras problema y un tercero que no presente suelo salino para ser tomado como muestra control.		
		Realizar los correspondientes análisis de laboratorio con los parámetros para determinar la salinidad de cada suelo.	Cuantitativo / Cualitativo	Descriptivo / Explicativo	Identificar los parámetros de salinidad del suelo destacados por cada suelo (CIC, CE, PSI, RAS y pH).			
	Adaptar el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos.	Identificar los parámetros de mayor relevancia para ser remediados por el método biomimético.					Justificar con bases teóricas (artículos científicos, libros, entidades gubernamentales, investigaciones) los resultados obtenidos en la actividad anterior.	
		Elegir los mejores materiales para la realización del montaje.					Probar y determinar los materiales que tengan un alto grado de absorción de agua a partir de las bitácoras de campo.	
		Determinar las condiciones y reactivos que pueden ayudar al proceso de remediación.	Cuantitativo / Cualitativo	Descriptivo / Explicativo / Correlacional	Adaptar el montaje en condiciones de invernadero con el fin de asemejar las condiciones naturales en las que trabaja el suelo en los cultivos			
Correlacionar el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisorio de recuperación sostenible	Realizar triplicados del montaje final por muestra de suelo					Hallar resultados homogéneos los análisis estadísticos no presenten desviación estandar significativa		
	Ejecutar los ensayos experimentales finales y determinar el porcentaje de sal cristalizada					Determinar la eficacia del proceso a partir de la sal cristalizada		
	Comparar los indicadores de salinidad de los suelos iniciales y finales	Cualitativo	Descriptivo / Correlacional	Establecer las diferencias iniciales y finales de los indicadores de salinidad del suelo				
	Comprobar y justificar la hipótesis a partir de análisis estadísticos					Comprobar la hipótesis y establecer las correlaciones entre los indicadores de salinidad del suelo, evaluando la sostenibilidad, eficiencia y eficacia del proceso.		

Basado en "Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation" propuesta por Swallow, M. J. & O'Sullivan, G

Nota: Esta tabla muestra un resumen de la metodología llevada a cabo, teniendo en cuenta cómo se llegó al objetivo general partiendo de cada objetivo específico

En esta misma línea, se expone el plan de trabajo llevado a cabo: la primera parte “Fase de investigación” responde principalmente al objetivo específico 1 “Seleccionar los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo”, donde se estableció que los indicadores a evaluar serían pH, textura, C.E, C.I.C, porcentaje de saturación de agua, iones como sodio, calcio y magnesio, relación de absorción de sodio y porcentaje de sales intercambiables para los suelos de cultivo de rosa bajo cubierta de invernadero, teniendo en cuenta que en la Sabana de Bogotá se encuentra el 79% del total de los cultivos de rosa en el país (DANE, 2010), dichos cultivos son sometidos a procesos antrópicos que promueven la formación y acumulación de sales en el suelo, por lo que son considerados suelos con alto riesgo de ser susceptibles a degradación por salinidad.

Después, se llevó a cabo la “Fase de recolección” que da cuenta del objetivo específico 2 “Adaptar el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos en cultivo de rosa bajo cubierta de invernadero.”, como se observa en la figura, se localizaron los suelos dedicados a la producción de rosa bajo cubierta de invernadero, que sirvieron como muestra experimental en los municipios de Tenjo, Tocancipá y Sopó ubicados en la Sabana de Bogotá, cabe mencionar que las muestras de suelo fueron proporcionados por las empresas directamente así como los análisis de suelo preliminares a la investigación.

Igualmente se ejecutó para el objetivo específico 2 la “Fase experimental”, donde se ajustó el protocolo base a las condiciones de campo en las que se trabajó en la Sabana, elaborando entonces bitácoras de campo que permitieron establecer los montajes con los que se obtuvieron los resultados finales de esta investigación, teniendo en cuenta que esta fase duró aproximadamente 4 meses y se realizaron los diferentes ajustes y adaptaciones a las circunstancias reales en las que se trabajó, además, se generaron fichas técnicas expuestas más adelante consecuencia de esta fase. También, se realizaron los cálculos del porcentaje de remoción de sales en cada ensayo realizado con el fin de descartar los materiales utilizados para poder obtener resultados óptimos. En esta fase se trabajaron los montajes de la manera más uniforme posible con el fin de evitar que el porcentaje de error fuera alto, adicionalmente en el apartado de resultados se observará como se llegó a trabajar con la cáscara de coco descartando otros materiales absorbentes, para visualizar de manera más detallada adjunto a este documento se encuentran las bitácoras de campo día a día con los resultados obtenidos y evidencia fotográfica.

Para finalizar la fase experimental se sometieron los montajes finales el análisis de indicadores edafológicos de salinidad en un laboratorio certificado que permitiera comparar las condiciones iniciales y finales que poseían las muestras de suelo.

Por último la “Fase de evaluación de resultados” que explica el objetivo específico 3 “correlacionar el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisorio de recuperación sostenible”, partió de los análisis estadísticos y comprobación de hipótesis a partir de la prueba de Tukey y correlaciones que se pudieron determinar a partir de los resultados de la fase anterior donde se tuvo en cuenta el tratamiento aplicado y el número de la muestra, resaltando la importancia de los análisis de laboratorio y los resultados de las bitácoras de campo. Esta evaluación permitió comprobar la viabilidad del proceso biomimético y la sostenibilidad del mismo, partiendo de las variables y técnicas expuestas anteriormente, con el fin de lograr el objetivo general del que se despliegan estos tres objetivos específicos mencionados.

Los análisis estadísticos se desarrollaron en Minitab, aplicando el método de Tukey para crear los intervalos de confianza entre las parejas de datos estudiadas, adicionalmente permitió controlar la tasa

de error del grupo total de datos trabajados, generando entonces un nivel de confianza del 95% (Minitab, 2020). Esta comparación entre los resultados obtenidos permitió examinar cuales eran diferentes y estimar el grado de diferencia entre ellos; el intervalo de confianza por su parte dio paso a evaluar la significancia estadística de los resultados obtenidos tanto en las bitácoras como en el laboratorio (Minitab, 2018), aunque el Software Minitab trabaja directamente las ecuaciones y arroja los resultados, a continuación se muestra la ecuación que se utiliza en el proceso, teniendo en cuenta que trabaja con el nivel de significancia (α), número de tratamientos (t), grados de libertad de error experimental (g_{lee}), cuadrado medio del error experimental (CM_{ee}), número de repeticiones de las medias de los tratamientos a ser comparadas (r) y la amplitud total estunderizada (q) (Aguas Bucheli, 2016).

$$W = q(t * g_{lee} * \alpha) * \sqrt{\frac{CM_{ee}}{r}}$$

Cabe resaltar que la fase de investigación estuvo latente desde el inicio hasta el fin del proyecto, adicionalmente, las demás fases no sólo garantizaron el cumplimiento del objetivo relacionado, sino que se integraron a los 3 objetivos en diferentes actividades dando respuesta al objetivo general como se mencionó anteriormente y se visualiza a lo largo del documento. Para resumir lo anterior de forma gráfica se evidencia la *figura 15*:

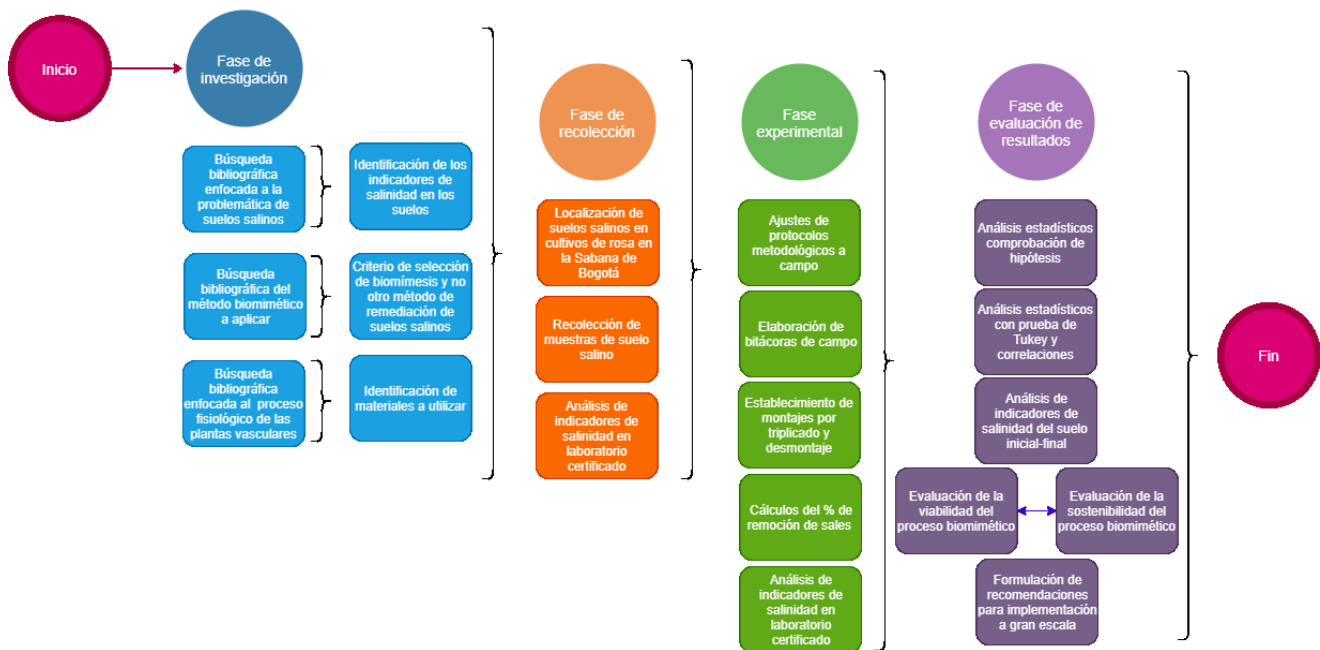


Figura 15. Plan de trabajo. Elaboración propia

Para las fases 2,3 y 4 anteriormente descritas, se tuvo en cuenta una metodología ajustada según la propuesta de Swallow, M. J., & O'Sullivan, G., se muestra entonces el paso a paso del montaje y desmontaje realizado para la obtención de las muestras que se enviaron a análisis de laboratorio para encontrar las diferencias en los parámetros establecidos respecto a la medición inicial, estos procedimientos se evidencian en las *figuras 16 y 17*, cabe aclarar que como cada muestra se llevó a

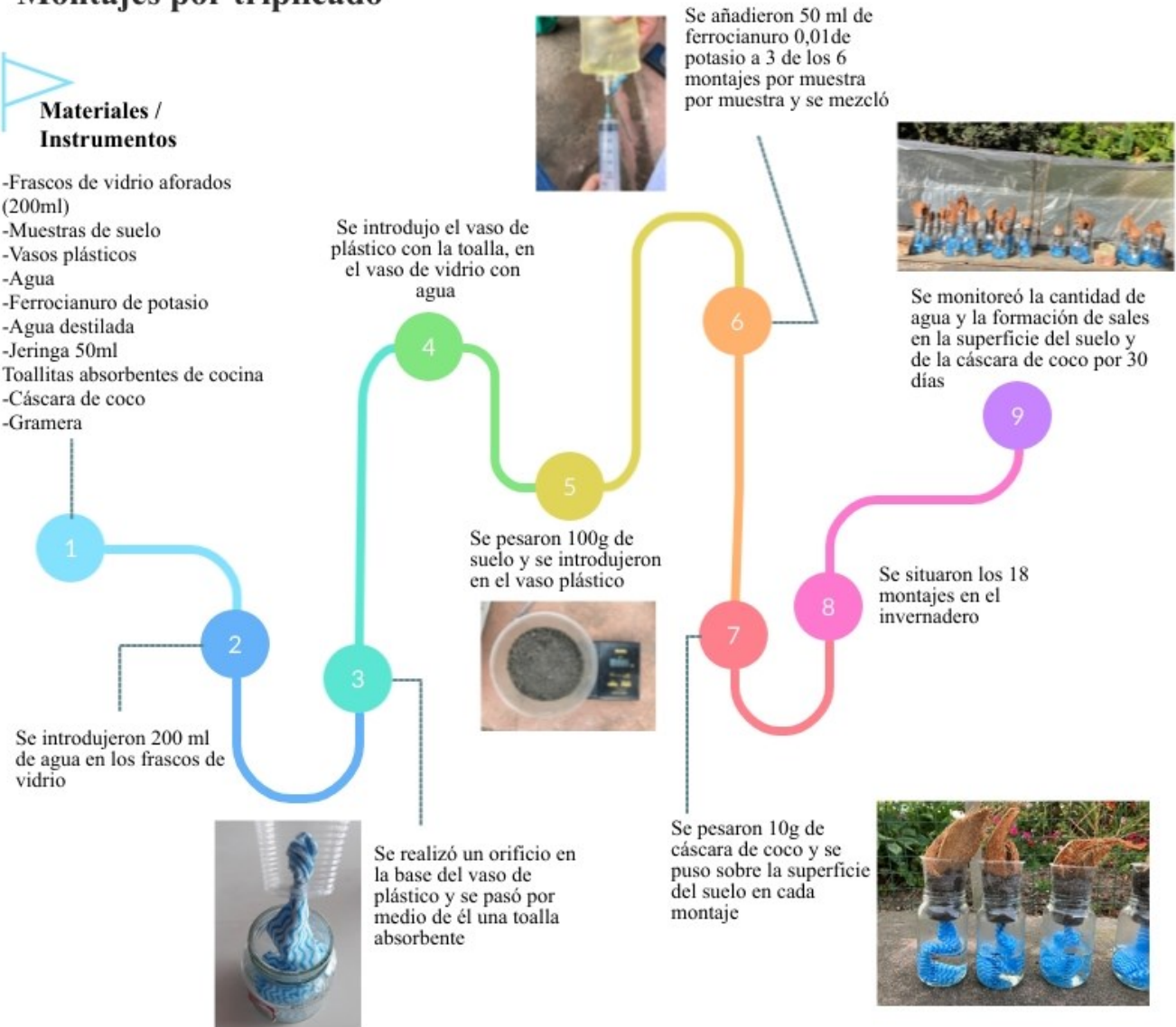
cabo el tratamiento por triplicado, se dio como resultado un total de 18 montajes, 6 de cada zona de muestreo.

Montajes por triplicado



Materiales / Instrumentos

- Frascos de vidrio aforados (200ml)
- Muestras de suelo
- Vasos plásticos
- Agua
- Ferrocianuro de potasio
- Agua destilada
- Jeringa 50ml
- Toallitas absorbentes de cocina
- Cáscara de coco
- Gramera



*Figura 16. Proceso montajes por triplicado
Elaboración propia*

Desmontaje y análisis de muestras

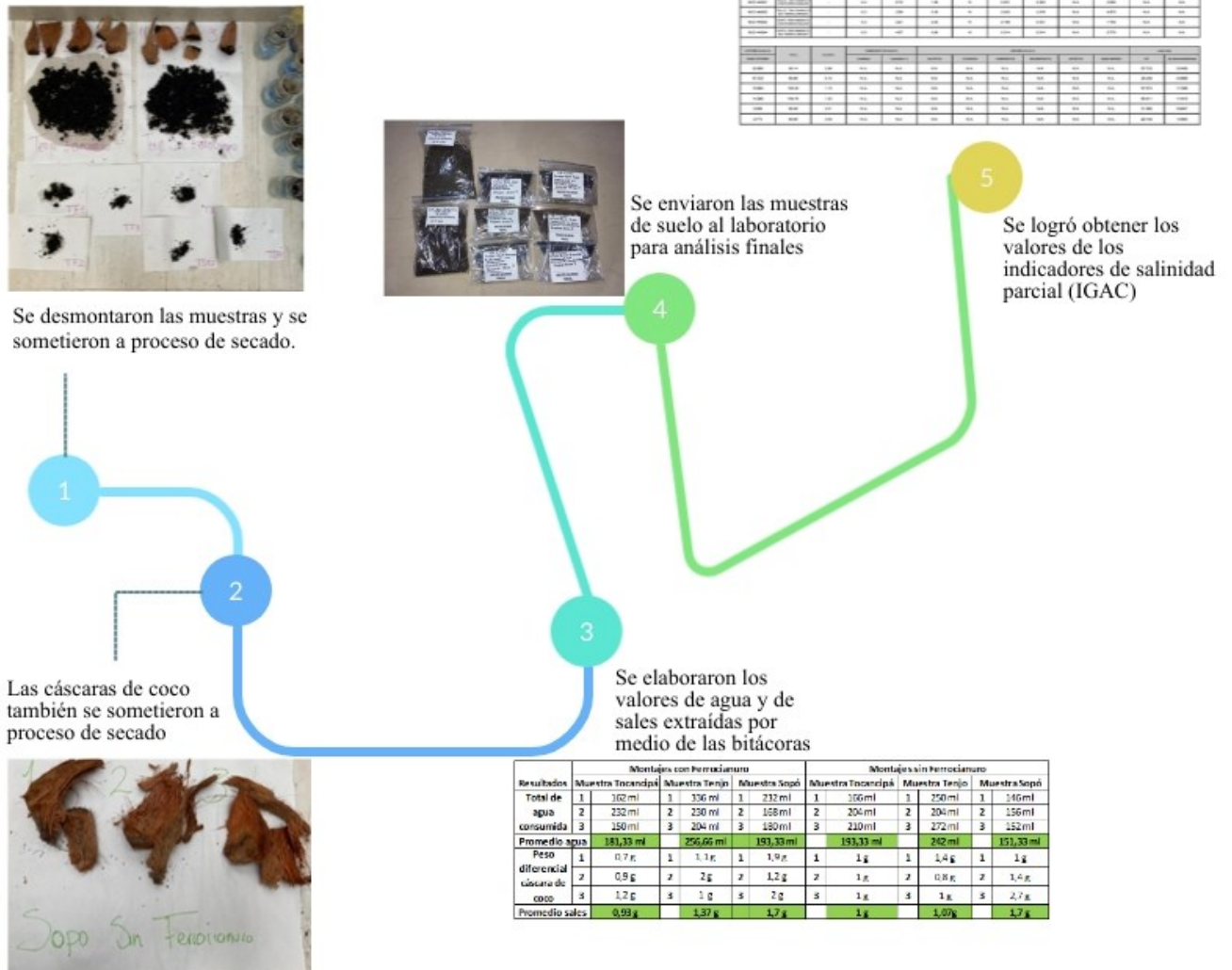


Figura 17. Proceso desmontaje y análisis de muestras
Elaboración propia

Respecto a la figura 16 y 17 cuando se realizó el proceso de secado del suelo y de las cáscaras de coco se dejó sobre papel periódico por 5 días bajo el sol para que la humedad contenida se evaporara y se pudiera realizar el pesaje, experimentación y envío de muestras a laboratorio de manera adecuada.

9 Resultados

Considerando los objetivos a alcanzar en esta investigación, se realizó la experimentación por fases, dando cumplimiento al enfoque cuantitativo y cualitativo como se explicó anteriormente en la metodología, adicionalmente se desarrolló cada etapa teniendo en cuenta el alcance exploratorio,

descriptivo y explicativo que permite cada objetivo, por lo anterior a continuación se describen los resultados obtenidos para cada objetivo específico.

9.1 Obj. Esp. 1: Seleccionar los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo.

En primer lugar se seleccionaron los indicadores a evaluar en los análisis de laboratorio de suelos, con el fin de conocer las condiciones previas a los tratamientos a los que se sometieron las muestras y las condiciones en que se obtuvo el suelo posterior al tratamiento aplicado. Según la revisión bibliográfica ya presentada en los anteriores apartados, los indicadores edafológicos de salinidad seleccionados para realizar el análisis de suelo fueron: pH, textura, conductividad eléctrica (C.E), capacidad de intercambio catiónico (C.I.C), porcentaje de saturación de agua, sodio, calcio, magnesio, relación de absorción de sodio (R.A.S) y porcentaje sales intercambiables (PSI), debido a que este conjunto de indicadores se relacionan directamente con las características con las que se logra identificar un suelo salino, sódico o salino-sódico. Los resultados presentados en la tabla a continuación permiten observar las condiciones iniciales de las muestras de suelo, nombrados por los municipios de donde se adquirió la muestra, como se puede visualizar algunos de los parámetros no fueron medidos en los 3 suelos, por lo cual también se escogieron aquellos parámetros cuyo valor era conocido desde el inicio de la fase experimental.

Los métodos de laboratorio aplicados por el IGAC para determinar los parámetros fueron:

pH: Potenciométrico en relación suelo/agua 1:1

Textura: Hidrómetro de Boyoucos - Densimétrico. Método IGAC adaptado a los suelos colombianos

C.E en suelos: Conductivimetría en extracto de saturación

RAS: Calculado.

Calcio, magnesio, sodio: Cuantificación absorción-emisión atómica a partir del extracto de saturación

Nota: Estos métodos se pueden corroborar en los análisis anexos.

Tabla 4
Indicadores de salinidad iniciales para las muestras de suelo

Parámetro	Cultivo Sopó	Cultivo Tenjo	Cultivo Tocancipá
pH	6,17	6,16	6
Textura	Arena 38%	Arena 47%	Arena 37%
	Limo 28%	Limo 42%	Limo 40%
	Arcilla 34%	Arcilla 10%	Arcilla 22%
	Franco-Arcilloso	Franco-Arenoso	Franco-Limoso
C.E (dS/m)	1,07	3,27	3,04
CIC	12,8	44,1	21,4
%Saturación H ₂ O	56	-	59,2
Sodio (Na)	84 mg/L	415 ppm	59 ppm
Calcio (Ca)	81,6 mg/L	5314 ppm	2318 ppm
Magnesio (Mg)	22,4 mg/L	1225 ppm	548 ppm
Potasio (K)	52,7 mg/L	705 ppm	580 ppm
RAS	11,6	7,26	1,56
Sulfatos	-	-	-
Cloruros	36,5 mg/L	-	-
Carbonato	-	-	-
Bicarbonatos	45,8 mg/L	-	-
Sodio Intercambiable	138 mg/kg	-	-
Relaciones Catiónicas			
Ca/Mg	3,95	-	2,57
Ca/K	7,18	-	7,79
Mg/K	1,82	-	3,03
(Ca+Mg)/K	9	-	10,83

9.2 Obj. Esp. 2: Adaptar el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos en cultivo de rosa bajo cubierta de invernadero.

Al mismo tiempo que se realizaba la selección de los indicadores edáficos, se implementó el ajuste de la metodología propuesta por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019), llevado a cabo en un tiempo aproximado de 4 meses, tomando en cuenta diferentes cantidades de sales así como se observa en las figuras 18, 19 y 20, de igual manera se probaron diferentes materiales absorbentes como toallas de cocina tanto de papel como de tela y cartón de huevos, con el fin de determinar el material con mejores rendimientos y cómo se observaban las sales que eran extraídas del suelo y retenidas en los materiales probados, para esto, se tenía en cuenta el peso inicial en seco del material absorbente y el peso final también en seco después de realizar el experimento del mismo material. A parte del material absorbente, se utilizaron frascos de vidrio con el fin de medir diariamente la cantidad de agua que salía

del proceso por capilaridad, absorción y evapotranspiración del suelo. También se observaron las condiciones climáticas en las que se ejecutaba la fase experimental, pues esto permitió establecer que si se dejaban al aire libre no se tendría el mismo efecto que bajo cubierta de invernadero. A continuación, se evidencian los montajes realizados y los resultados obtenidos en cada uno de ellas.

Prueba 1	
Montaje 1	Montaje 2
1 Vaso de vidrio	1 Vaso de vidrio
1 Vaso plástico	1 Vaso plástico
1 Toalla absorbente de cocina	2 Toallas absorbentes de cocina
100 g de suelo	100 g de suelo
180 ml de agua de llave	180 ml de agua de llave
50 ml Sln 3M NaCl (50ml agua+8,76g NaCl)	50 ml Sln 3M NaCl (50ml agua+8,76g NaCl)
7 días de tratamiento	
El experimento con dos toallas absorbe más agua y recoge mayor cantidad de sal respecto al experimento con un solo paño, obteniendo al final 2,5cm y 1,5cm de altura de agua respectivamente, por lo que se afirma que el mejor prototipo es el que tiene dos paños absorbentes en la parte superior.	
25,74% de recuperación de sal añadida	53,63% de recuperación de sal añadida
Prueba 2	
Montaje 1	Montaje 2
1 Vaso de vidrio	1 Vaso de vidrio
1 Vaso plástico	1 Vaso plástico
1 Toalla absorbente de cocina	2 Toallas absorbentes de cocina
100 g de suelo	101 g de suelo
180 ml de agua de llave	181 ml de agua de llave
50 ml Sln 3M NaCl (50ml agua+8,76g NaCl)	51 ml Sln 3M NaCl (50ml agua+8,76g NaCl)
50 ml Sln 1M $C_6FeK_4N_6$ (50ml agua+0,21g)	-
7 días de tratamiento	
Se da cuenta de la importancia de las condiciones climáticas a las que sea puesto el montaje, pues en días de sol se evidencia la absorción de agua por parte del suelo y así mismo el ascenso de las sales, por lo que es necesario poner el experimento en las condiciones más reales posibles.	
31% de recuperación de sal añadida	39,9% de recuperación de sal añadida



Figura 18. Resultados ajuste protocolo Fase 1 y 2.

En las figuras anteriormente expuestas, se resaltan los resultados obtenidos en color verde para la recuperación de sal añadida al suelo, siendo este el resultado más importante en el experimento, puesto que permitió verificar que el proceso biomimético se llevó a cabo con los materiales escogidos en cada prueba, adicionalmente se compararon los materiales utilizados en cada prueba, identificando entonces que los montajes a los que se añadía ferrocianuro de potasio como lo proponían Swallow, M. J., & O'Sullivan, G. eran más evidentes a la hora de evaluar la eficiencia del proceso, puesto que se generaban unos cristales blancos en las superficies que quedaban expuestas al aire libre. En adición, se verificó la proporción de recuperación de sal por el material absorbente teniendo en cuenta el peso del material como se puede observar en la descripción de las figuras. Estos resultados también pueden verse con más detalle en los anexos adjuntos al documento.




Prueba 3		
Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
Ferrocianuro + toallas	Ferrocianuro + cartón y toallas	Sin ferrocianuro
Suelo 100g	Suelo 100g	Suelo 100g
50 ml Sln 0,01M Ferrocianuro (50ml agua+0,2g F)	50 ml Sln 0,01M Ferrocianuro (50ml agua+0,2g F)	-
50 ml Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)	50 ml Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)	50 ml Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)
2 Toallitas absorbentes	Toallita absorbente + 2 cubitos de cartón	2 Toallitas absorbentes
Agua 180ml (4cm)	Agua 180ml (4cm)	Agua 180ml (4cm)
Vaso plástico	Vaso plástico	Vaso plástico
Vaso de vidrio	Vaso de vidrio	Vaso de vidrio
15 días de tratamiento		
<p>Aparentemente el proceso tiene mayor eficiencia de remoción de sales en el híbrido de cartón y toallitas puesto que el peso final es el más alto, sin embargo hubo pérdida de cristales en el experimento con ferrocianuro y toallitas. Además de esto cabe resaltar que el peso de los cristales varía si estan húmedos o secos; el peso del experimento híbrido da un peso mayor al inicial puesto que se añadieron solo 8,7g de sal. El experimento sin ferrocianuro demuestra que las sales también se remueven sin ferrocianuro y este solo es un indicador para demostrar la presencia y formación de los cristales en los materiales que se estan poniendo sobre el suelo.</p>		
65% de recuperación de sal añadida	107% de recuperación de sal añadida	58% de recuperación de sal añadida
		
Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3

Figura 19. Resultados ajuste protocolo Fase 3.

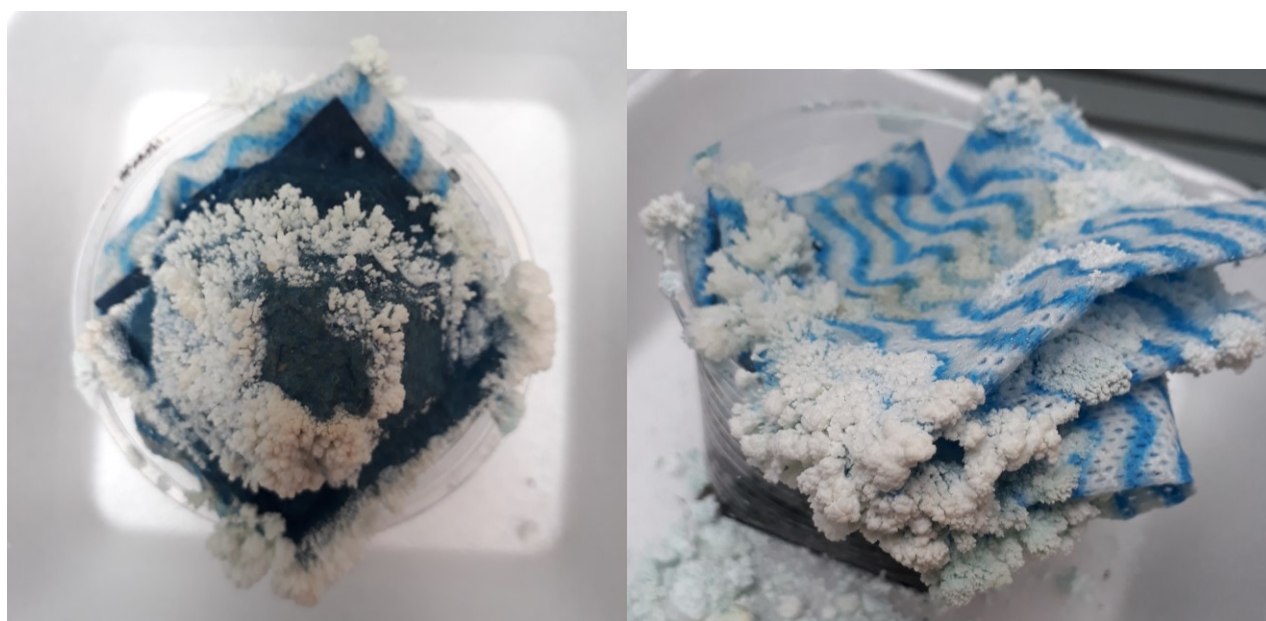


Figura 20. Cristales de ferrocianuro de potasio y sal

De acuerdo a los resultados obtenidos en las fichas anteriormente expuestas, al añadir ferrocianuro de potasio los cristales de sal afloran de manera notoria en color blanco como se visualiza en las fotografías en la figura 19 y 20, adicionalmente se concluye que las toallas de cocina y el cartón,

simulan de manera adecuada el proceso de capilaridad- evapotranspiración de las plantas vasculares. Acto seguido a la observación del montaje funcional, se probaron y compararon materiales que se pudieran degradar y respondieran a la sostenibilidad de los cultivos, para ello se tuvo en cuenta que los cultivos de rosa de los cuales se tomaron las muestras de suelo, manejan en su proceso productivo sustratos como cascarilla de arroz cruda, cascarilla de arroz quemada y fibra de coco, por ello, se realizaron pruebas de ajuste metodológico para cada uno de ellos, relacionados a continuación.


Prueba 4		
Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
Cascara de coco	Cascarilla quemada	Cascarilla cruda
Suelo 100g	Suelo 100g	Suelo 100g
Sln 0,01M Ferrocianuro (50ml agua+0,2g F)	Sln 0,01M Ferrocianuro (50ml agua+0,2g F)	Sln 0,01M Ferrocianuro (50ml agua+0,2g F)
Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)	Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)	Sln 3M NaCL (50ml agua+8,76g NaCl)
3,9g cascara de coco	4g cascarilla quemada	4g cascarilla cruda
Agua 180ml (4cm)	Agua 180ml (4cm)	Agua 180ml (4cm)
Vaso plástico	Vaso plástico	Vaso plástico
Vaso de vidrio	Vaso de vidrio	Vaso de vidrio
15 días de tratamiento		
Se observa que el coco puede absorber más cantidad de agua y de sales, las cascarillas aunque remueven la sal no se humedecen tanto; el consumo de agua es mayor por parte de la cáscara de coco, seguido de la cascarilla quemada y por último la cascarilla cruda.		
26% de recuperación de sal añadida	24% de recuperación de sal añadida	21% de recuperación de sal añadida
		

Figura 21. Resultados ajuste protocolo Fase 4.

Como resultado final del ajuste metodológico, se realizaron los montajes finales con las tres muestras de suelo que se tenían para esta investigación, se observa en detalle cómo se realizó en el capítulo de metodología y se presentan con detalle los resultados en los anexos. En la figura 21 a continuación, se muestra de forma gráfica la comparación entre un sistema natural y el sistema artificial en que se basa esta propuesta, evidenciando cómo quedó el prototipo ejecutado y cómo trabaja el sistema de la planta vascular cuyo proceso se imita. Este montaje como se evidencia en la metodología, se dejó 30 días en condiciones de invernadero con el fin de simular las condiciones reales en las que trabajan estos suelos en los cultivos de rosa, generando entonces las bitácoras anexas.

PROTOTIPO DEL MÉTODO BIOMIMÉTICO DE UNA PLANTA VASCULAR

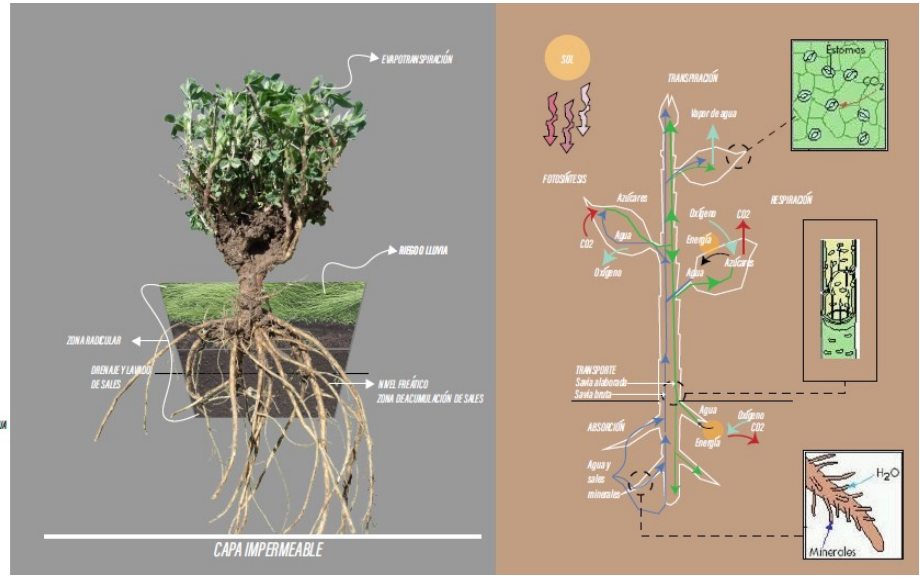
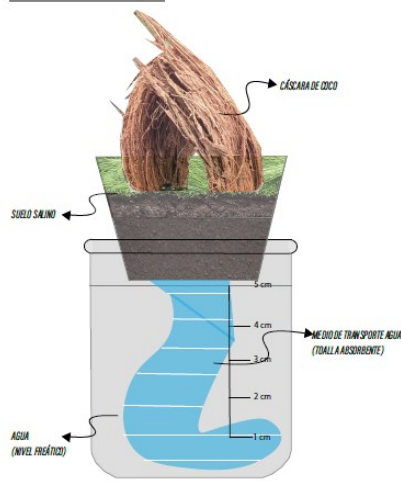


Figura 22. Prototipo del método biomimético de una planta vascular. Comparativo montaje vs. planta vascular. Elaboración propia

La *figura 22* permite observar cómo estaba compuesto el prototipo biomimético por los diferentes materiales utilizados, adicionalmente se compara con los procesos que lleva a cabo la planta vascular y la ubicación de las zonas más importantes donde se realizan los procesos de ósmosis, capilaridad y evapotranspiración. Adicionalmente en la *figura 23* se observa cómo fue el resultado obtenido para el tratamiento de la muestra de suelo de Sopo sometida al tratamiento con ferrocianuro, visualizando cómo quedó el prototipo biomimético de la planta vascular con cáscara de coco en condiciones de invernadero.



Figura 23. Tratamientos con ferrocianuro aplicados a la muestra de Sopo.

9.3 *Obj. Esp. 3: Correlacionar el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisorio de recuperación sostenible*

De acuerdo con los resultados de los objetivos específicos 1 y 2 se correlaciono la información del prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad de suelos para los tratamientos, completándose al realizar los análisis posteriores al tratamiento biomimético aplicado; cabe resaltar que estos análisis iniciales son suministrados por cada empresa.

Después de dejar los tratamientos por un mes en condiciones controladas en invernadero, se obtienen los resultados a continuación mencionados como “Ubicación espacial (Municipio)” y tratamiento aplicado TSF y TCF siendo tratamiento sin ferrocianuro de potasio y tratamiento con ferrocianuro de potasio respectivamente. Los análisis de las muestras finales se centralizaron en el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

De acuerdo a los resultados ya expuestos, se logró realizar el análisis para los 18 montajes con las 3 muestras de suelo y evaluar los indicadores seleccionados por muestra y tratamiento como se muestra a continuación, la explicación de tabla 5 se evidenciará en el análisis y discusión de resultados.

Tabla 5
Análisis de laboratorio muestras de suelos

Parámetro	Cultivo Sopó	Cultivo Sopó TCF	Cultivo Sopó TSF	Cultivo Tenjo	Cultivo Tenjo TCF	Cultivo Tenjo TSF	Cultivo Tocancipá	Cultivo Tocancipá TCF	Cultivo Tocancipá TSF
pH	6,17	6,3	6	6,16	6,4	6,2	6	6,2	5,4
Arena		38%			47,70%			37,30%	
Limo		28%			42,00%			40,70%	
Arcilla		34%			10,30%			22,00%	
Textura	Franco-Arcilloso			Franco-Arenoso			Franco-Limoso		
C.E (dS/m)	1,07	0,31	0,49	3,27	1,15	1,53	3,04	2,89	6,14
CIC	12,80	31,88	29,10	44,10	57,57	55,81	21,40	27,73	28,26
%Saturación H2O	56	68,46	66,85	-	100,3	109,75	59,2	68,14	69,66
Sodio (Na) mmol/L	3,65	0,85	1,07	18,05	1,14	1,16	2,57	0,25	0,49
Calcio (Ca) mmol/L	2,04	0,169	0,314	132	2,261	3,543	53,84	12,84	32,525
Magnesio (Mg) mmol/L	0,92	0,43	0,61	50,40	2,52	3,62	22,55	7,64	17,01
RAS	11,6	3,21	4,07	7,26	2,12	2,58	1,56	1,34	2,22
PSI	28,52	2,65	3,66	40,93	1,98	2,08	12,01	0,89	1,73

Nota: En la tabla anterior se evidencia el consolidado de los análisis de laboratorio obtenidos antes y después del tratamiento aplicado

Adicionalmente, de las bitácoras de campo experimentales, se logró obtener los resultados del total de agua consumida durante el proceso y la diferencia entre el peso de la cáscara de coco seca pre y posterior al montaje, de esta última se estima que esa diferencia de peso corresponde a las sales extraídas del suelo, los pesos se observan por tipo de tratamiento aplicado en la tabla a continuación:

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos a través de las bitácoras durante el tiempo de experimental del montaje final, donde se pudo determinar el total de agua consumida y de sales extraídas por cada uno de los 18 montajes y se realizó un promedio para poder estandarizar las muestras

Tabla 6
Resultados bitácoras por montaje

Resultados	Montajes con Ferrocianuro						Montajes sin Ferrocianuro					
	Muestra Tocancipá	Muestra Tenjo	Muestra Sopó	Muestra Tocancipá	Muestra Tenjo	Muestra Sopó	Muestra Tocancipá	Muestra Tenjo	Muestra Sopó	Muestra Tocancipá	Muestra Tenjo	Muestra Sopó
Total de agua consumida	1	162 ml	1	336 ml	1	232 ml	1	166 ml	1	250 ml	1	146 ml
	2	232 ml	2	230 ml	2	168 ml	2	204 ml	2	204 ml	2	156 ml
	3	150 ml	3	204 ml	3	180 ml	3	210 ml	3	272 ml	3	152 ml
Promedio agua		181,33 ml		256,66 ml		193,33 ml		193,33 ml		242 ml		151,33 ml
Peso diferencial cáscara de coco	1	0,7 g	1	1,1 g	1	1,9 g	1	1 g	1	1,4 g	1	1 g
	2	0,9 g	2	2 g	2	1,2 g	2	1 g	2	0,8 g	2	1,4 g
	3	1,2 g	3	1 g	3	2 g	3	1 g	3	1 g	3	2,7 g
Promedio sales		0,93 g		1,37 g		1,7 g		1 g		1,07g		1,7 g

En la anterior tabla se observa principalmente que la mayor cantidad de sales extraídas se presentó en los montajes con suelo del cultivo de Sopó, sin embargo, los montajes que mayor cantidad de agua absorbieron fueron los que contenían suelos con muestras del cultivo de Tenjo.

Por último y respondiendo a la evaluación de la reducción de la salinidad en suelos, se realiza el análisis estadístico por medio del coeficiente de determinación R^2 y la prueba de Tukey para los 18 montajes realizados, ya que estos modelos estadísticos permiten no solo predecir los resultados, sino además probar la hipótesis del proyecto “el modelo biomimético es efectivo para reducir la salinidad de los suelos evaluados”, de allí se determinaron los montajes más representativos por método aplicado y muestra de suelo asignando para cada montaje un número de distinción, luego se comparan arrojando entonces un porcentaje de confianza del 95% como se muestra en las *figuras 24 y 25*:

La primera gráfica se realizó para los 18 montajes tanto por cantidad de agua absorbida como por sales extraídas, observando las gráficas de correlación con los resultados obtenidos, mostrados en las bitácoras, es importante señalar que los días graficados en la *figura 24* responden a las letras numeradas de la A-W teniendo un total de 21 días, teniendo en cuenta que después del día 15 se midieron los montajes día de por medio. Adicionalmente, a cada triplicado se le asignó un código para poder identificarlo en el análisis estadístico por medio de números de la siguiente manera:

- Cultivo Sopo: M7-18
- Cultivo Sopo TFC: M7
- Cultivo Sopo TSF: M18
- Cultivo Tenjo: M3-15
- Cultivo Tenjo TCF: M3

- Cultivo Tenjo TSF: M15
- Cultivo Tocancipá: M2-10
- Cultivo Tocancipá TCF: M2
- Cultivo Tocancipá TSF: M10

Cabe aclarar que los números no significan nada específico, solo se asignaron de esta manera para poder diferenciar las muestras que se estaban trabajando.

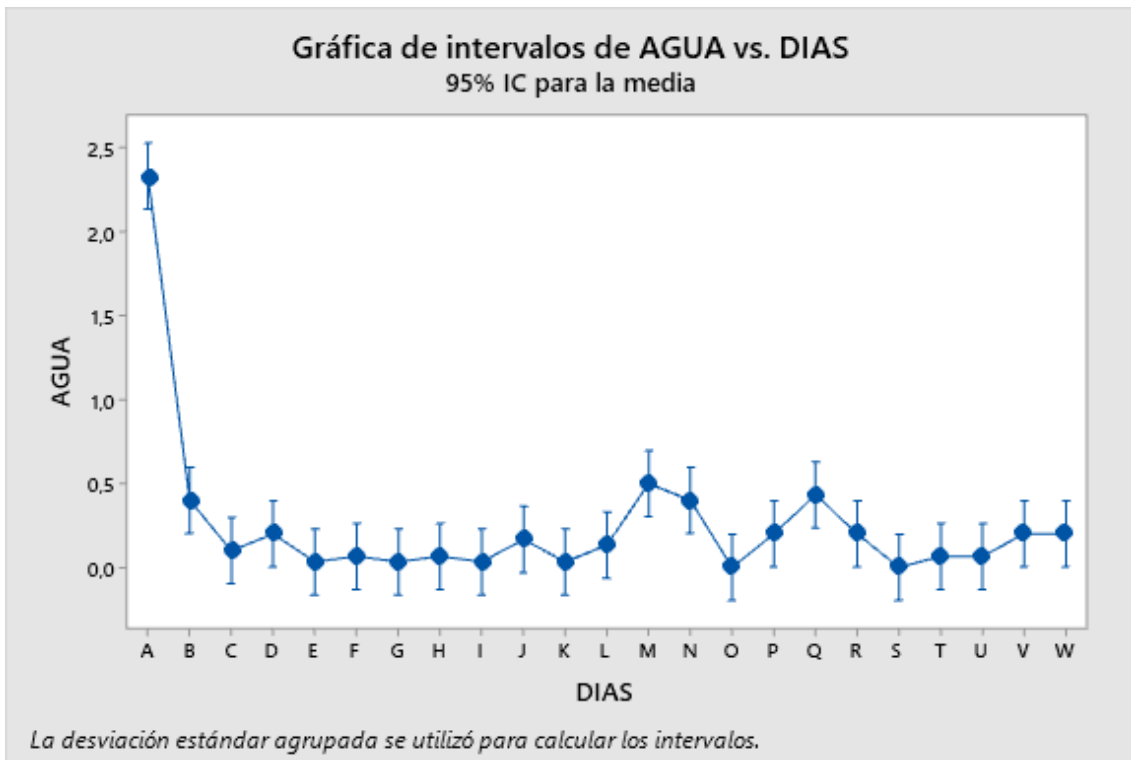


Figura 24. Demostración gráfica disminución del agua en días por montaje.

En las gráficas como la *gráfica 24* se observan las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes, en este orden, en este orden se observa que la gráfica tiene diferencia mayormente más significativa en las medias se encuentra en el día 1 en comparación con la variabilidad de los días siguientes. Este mismo análisis se ejecutó para las 9 muestras evaluadas.

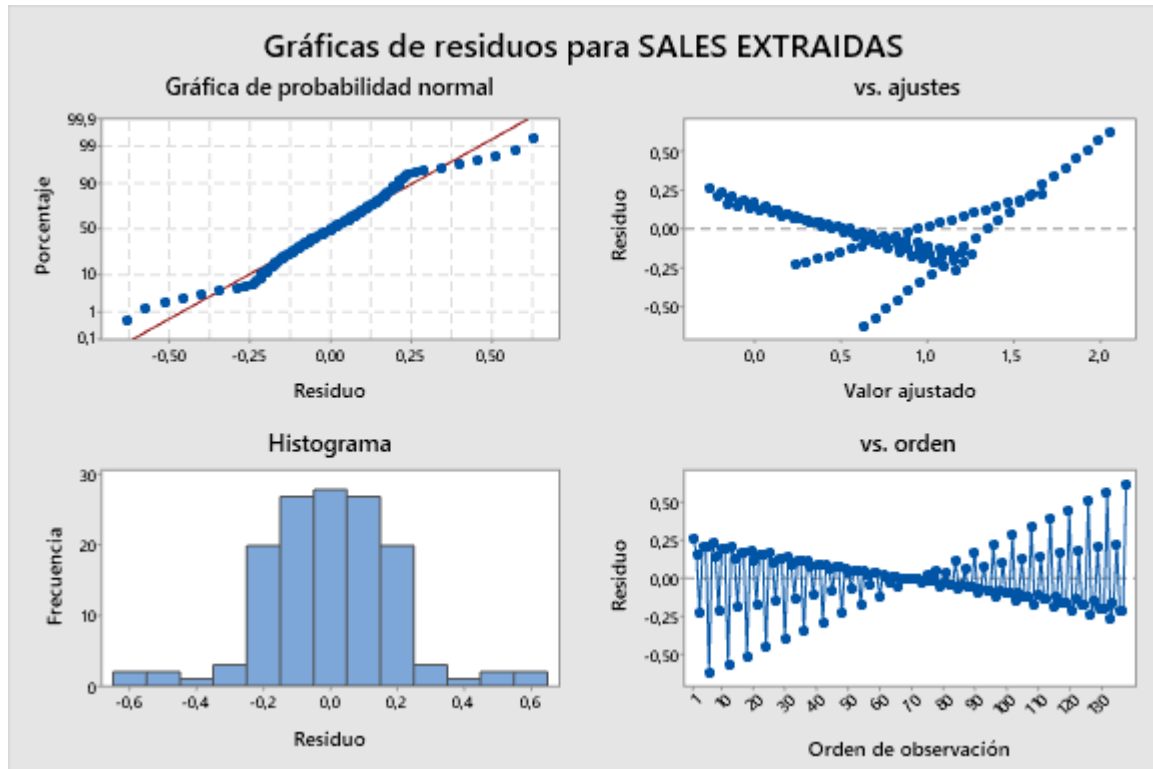


Figura 25. Demostración gráfica sales extraídas por montaje.

En las gráficas realizadas como la *figura 25* que responde las sales extraídas, se explica el % de variabilidad de los datos obtenidos, se aprecian los puntos cercanos a la línea de tendencia mostrada, lo cual demuestra normalidad en los datos y se procedió a verificar los datos que genera la prueba ANOVA. Después se tiene la hipótesis nula “Todas las medidas son iguales” y la hipótesis alterna “no todas las medidas son iguales”, teniendo en cuenta las hipótesis se somete cada grupo de datos a arrojar un F de Fisher crítica, de allí se determina si es mayor o menor que la F de ANOVA y se acepta la hipótesis nula o alterna, por último se procede a realizar la prueba Tukey para el reconocimiento de montaje con mayor disminución de agua.

Al obtener los resultados para prueba de Tukey se agrupan solo aquellos montajes que fueron significativamente diferentes respecto a los demás, para esto se tuvo en cuenta el código asignado a cada triplicado, y el estudio general de eficiencia de los montajes, para esta agrupación se dió un índice de confianza del 95% y se obtienen las *figuras 26 y 27*:

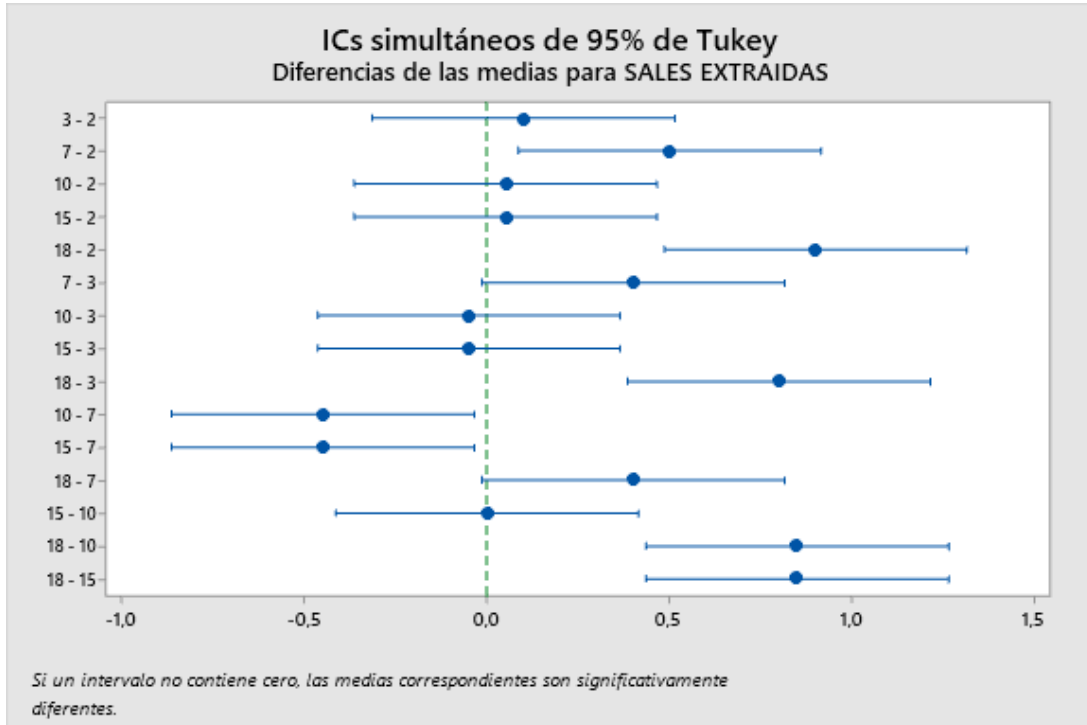


Figura 26. Índice de Confianza de montajes.

La figura 26 muestra los intervalos de confianza simultaneo al 95% de Tukey donde se observa las diferencias de las medias para sales extraídas.

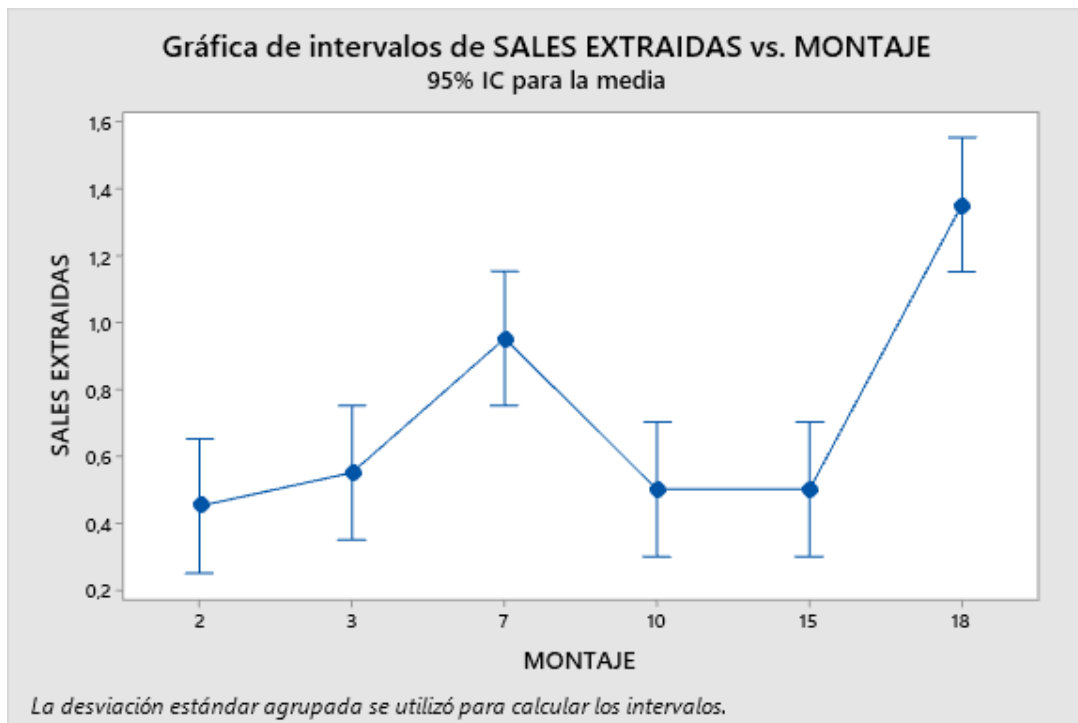


Figura 27. Comparación de montajes representativos.

Una vez realizada la prueba ANOVA - Tukey para cada montaje, y la selectividad de los montajes en función de las medias significativamente diferentes se concluye gracias a la *figura 26 y 27* que el involucramiento del factor de sales extraídas al estudio determina la efectividad de los mismos donde el montaje 18 (Montaje Sopó sin Ferrocianuro) y montaje 7 (Montaje Sopó con Ferrocianuro) poseen la mayor efectividad en comparación a los 16 montajes adicionalmente diseñados. Esto también se demostró en los resultados evidenciados en la Tabla 5.

Tabla 7

Correlación de Pearson con nivel de confianza del 95%

	SALES				C.E (dS/m)	C.E (dS/m)
	EXTRAIDAS	AGUA	PH inicial	PH final	inicial	final
AGUA	-0,240					
PH inicial	0,318	0,040				
PH final	0,032	0,047	0,599			
C.E (dS/m) inicial	-0,524	0,055	-0,462	-0,084		
C.E (dS/m) final	-0,323	-0,031	-0,869	-0,834	0,532	
%Saturación H2O inicial	0,211	-0,092	-0,496	-0,486	-0,540	0,304
%Saturación H2O final	-0,254	0,083	0,422	0,409	0,596	-0,216
Sodio (Na) inicial	-0,204	0,092	0,509	0,492	0,528	-0,316
Sodio (Na) final	0,219	0,065	0,922	0,420	-0,184	-0,661
Calcio (Ca) inicial	-0,404	0,086	0,064	0,256	0,855	0,091
Calcio (Ca) final	-0,285	-0,039	-0,868	-0,862	0,445	0,994
Magnesio (Mg) inicial	-0,419	0,084	0,020	0,230	0,877	0,129
Magnesio (Mg) final	-0,323	-0,033	-0,871	-0,834	0,523	1,000
RAS inicial	0,457	0,005	0,924	0,470	-0,767	-0,859
RAS final	0,525	-0,017	0,693	-0,019	-0,828	-0,532
PSI inicial	0,078	0,075	0,880	0,631	0,014	-0,695
PSI final	0,524	-0,001	0,739	0,036	-0,788	-0,571
						Calcio
	%Saturación	%Saturación	Sodio (Na)	Sodio (Na)	Calcio	
	H2O inicial	H2O final	inicial	final	(Ca)	
					inicial	
AGUA						
PH inicial						
PH final						
C.E (dS/m) inicial						
C.E (dS/m) final						
%Saturación H2O inicial						
%Saturación H2O final	-0,984					
Sodio (Na) inicial	-1,000	0,983				
Sodio (Na) final	-0,695	0,636	0,705			
Calcio (Ca) inicial	-0,898	0,918	0,892	0,332		
Calcio (Ca) final	0,388	-0,305	-0,399	-0,687	-0,007	
Magnesio (Mg) inicial	-0,878	0,901	0,871	0,292	0,999	
Magnesio (Mg) final	0,315	-0,227	-0,326	-0,669	0,079	
RAS inicial	-0,126	0,048	0,140	0,747	-0,323	
RAS final	0,154	-0,195	-0,141	0,597	-0,527	
PSI inicial	-0,849	0,795	0,856	0,942	0,530	
PSI final	0,070	-0,133	-0,057	0,666	-0,454	

	Calcio (Ca) final	Magnesio (Mg) inicial	Magnesio (Mg) final	RAS inicial	RAS final	PSI inicial
AGUA						
PH inicial						
PH final						
C.E (dS/m) inicial						
C.E (dS/m) final						
%Saturación H2O inicial						
%Saturación H2O final						
Sodio (Na) inicial						
Sodio (Na) final						
Calcio (Ca) inicial						
Calcio (Ca) final						
Magnesio (Mg) inicial	0,032					
Magnesio (Mg) final	0,996	0,118				
RAS inicial	-0,820	-0,365	-0,856			
RAS final	-0,478	-0,559	-0,532	0,859		
PSI inicial	-0,741	0,492	-0,702	0,631	0,338	
PSI final	-0,523	-0,488	-0,572	0,876	0,988	0,412

Nota: En la tabla anterior se muestra el análisis correlacional de los parámetros de salinidad y montajes

En la tabla anterior, se observa que debido a que la variable de interés son las sales extraídas por montaje en función de los parámetros de laboratorio según el análisis correlacional de Pearson para datos con distribución normal se concluye que los niveles de correlación son de naturaleza baja-moderada.

Cabe resaltar que los cambios de los indicadores físicos (textura y porcentaje de saturación de agua) no se evidenciaron puesto que hubiese implicado que con los tratamientos aplicados al suelo se hubiese afectado el tamaño de las partículas y su composición, lo cual solo se deriva de ciclos de hielo-deshielo, lluvia y otros ambientales, sin embargo, para el caso de los tratamientos llevados a cabo no se ejerció un cambio significativo sobre estos indicadores. (García Y. et al., 2012).

Por otro lado, los indicadores químicos varían debido a la acción del agua, oxígeno, CO₂ y compuestos orgánicos (García Y. et al., 2012), esto quiere decir, que los indicadores evaluados se modificaron debido a la acción del agua en el suelo, puesto que al moverse a través de él generó la alteración de los compuestos del suelo, dando como resultado cambio en el pH, sodio intercambiable, capacidad de intercambio catiónico, relación de absorción de agua, porcentaje de sodio intercambiable y en la concentración de los elementos químicos evaluados Calcio, Magnesio y Sodio.

Nota: Adicional a este documento se adjuntan las bitácoras, análisis de laboratorio y resultados estadísticos que soportan los resultados expuestos anteriormente como anexos.

10 Análisis y discusión de resultados

De acuerdo con los resultados anteriormente presentados, es importante señalar en primer lugar, que debido a los resultados derivados de los montajes anteriormente descritos, se logra el ajuste

metodológico, escogiendo entonces la fibra de coco como material absorbente, puesto que como menciona (Quintero et al., 2012), este es un material que presenta capacidad de amortiguamiento térmico, además de su alta capacidad de retención hídrica, característica demostrada en los resultados obtenidos experimentalmente.

Adicionalmente, como fue mencionado, se tuvo en cuenta que la cascarilla de arroz, aunque se considera un buen material como sustrato, y se puede reutilizar después de pasar por un proceso de esterilización, tiene desventajas debido a la contaminación del aire que genera en su proceso de quema, además de su riesgo de escases en el país y el aumento de costo que esta pueda sufrir debido a la producción del cereal. Adicional a esto, aunque la cáscara de coco puede presentar como desventaja el costo de transporte desde las zonas costeras hacia los diferentes lugares del país, tiene un costo de adquisición bajo (Quintero et al., 2012).

Por otra parte, en concordancia con el objetivo general de esta monografía “*evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tenjo - Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo*”, es relevante interpretar los resultados obtenidos a través de los análisis de laboratorio. En primer lugar, las propiedades biológicas se relacionan directamente con las propiedades físicas y químicas, por lo cual, para definir un suelo como fértil es necesario que conserve los indicadores de cada propiedad en niveles adecuados mientras suministra agua y nutrientes manteniéndose entonces como soporte para las plantas (García Y. et al., 2012)

Como se ha afirmado en párrafos anteriores, es conocido que, por efectos de riego o lluvia, las sales pueden ascender, en caso de que el sistema de drenaje del suelo sea deficiente, ocasionando este efecto por ascenso capilar. Este efecto, es el que se puede observar en los experimentos realizados, puesto que el "nivel freático" junto a las demás condiciones ya conocidas, no permitían hacer un lavado descendente de las sales, por lo que, por medio de absorción y evapotranspiración, se dio paso al ascenso capilar. Es importante señalar, que en un caso real, aunque las sales descendan hasta el nivel freático, en caso de lluvia intensa o riego excesivo, el nivel freático asciende subiendo con él las sales acumuladas, llegando entonces a la zona radicular o a la superficie del suelo, generando entonces concentración de sales en la superficie y hasta costras salinas debido al proceso de evapotranspiración llevado a cabo (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se explica por qué ascendieron las sales hasta la superficie del suelo y fueron absorbidas por la cáscara de coco, haciéndose visible en los diferentes montajes por medio del ferrocianuro de potasio en forma de cristales blancos. Sin embargo, también es necesario resaltar que la fibra de coco proviene de la zona costera con concentraciones de sal retenidas en la cáscara, que deben ser eliminadas mediante lavado, antes de utilizarse en el suelo, puesto que podría darse lugar a la transferencia de sales coco-suelo y no suelo-coco, como se es esperado. Adicionalmente, las fibras del coco se comportan como esponjas, por lo que la capacidad de retención de agua del material es alta, al igual que su equilibrio entre la retención de agua y la capacidad de aireación; el pH de la fibra oscila entre 5,5 y 6,5 resultando entonces, un material apropiado que no afecta el pH de la mayoría de plantas. Es importante mencionar, que este material tiene la capacidad de retener y liberar nutrientes (CIC), teniendo efectos positivos sobre el crecimiento de las raíces y por tanto de las plantas (Agromática, 2014).

Dentro de este orden de ideas, en los resultados de laboratorio se observa un leve aumento del 15 al 20% en el porcentaje de saturación de agua, lo que indica que las sales que se encontraron en las muestras de suelo al final de los tratamientos se encontraban más solubles y por ende se transportan con mayor facilidad por medio del suelo gracias al contenido de agua (Azcón-Bieto & Talón, 2013) verificando nuevamente las afirmaciones anteriores. Courel (2019), también menciona que cuando se favorece el proceso de floculación a partir de la solución de sales que pueden salir del suelo, se favorece la estructura del suelo y por ende la fertilidad del mismo.

Por su parte, en las propiedades químicas evaluadas se encuentra que en los experimentos realizados se observa la variación del pH en aumento en los montajes TFC y disminuyeron en los montajes SFC, aunque los valores se encuentran entre 5,4 y 6,4 el cultivo de rosa tolera el suelo ácido, sin embargo los valores deben oscilar en torno a 6, puesto que no se tolera el exceso de calcio ni tampoco de sales solubles, se conoce que tiene mejor desarrollo en un valor de pH 6,5 por lo cual, aunque el tratamiento de la muestra de Sopo y Tenjo con ferrocianuro se acercan a este valor, es necesario evaluar los demás indicadores evaluados para saber el suelo con mejores condiciones para este cultivo (Infoagro Systems S.L., 2010; Ruben, 2016), teniendo en cuenta además que al presentar un valor de pH más alto, las sales son más solubles en el agua (FAO, 2020).

Ahora bien, la conductividad eléctrica, mide la capacidad del suelo para conducir la electricidad, entre más aumente su valor, mayor es la concentración de las sales en el suelo, dentro de los montajes realizados el valor máximo se encuentra en el cultivo de Tocancipa TFS donde en lugar de disminuir al igual que en los demás montajes, la CE aumentó hasta 6,14, indicando entonces según la clasificación de la CAR previamente citada en este texto, que el suelo solo con este parámetro indica que tiene un grado de salinidad moderado, sin embargo, en los demás montajes este indicador varía entre 0,31 y 2,89, indicando para el cultivo de Sopo y Tenjo un grado de salinidad muy ligero y para Tocancipa TCF grado ligero. Este resultado aunque no es el ideal, muestra que la muestra con mayor contenido de sales (Tenjo) disminuyó significativamente su grado de salinidad (Rosas Sanchez, 2008).

En consecuencia, se relaciona la textura con la C.E, pues como se mencionó anteriormente aunque el valor del último indicador mencionado disminuyó en la mayoría de tratamientos, está altamente influenciada por la textura y la cantidad de arcilla presente en la composición del suelo, aumentando así la absorción de sales solubles como afirma Herrero (1985).

En este sentido se resalta de la textura que las arcillas presentan una carga eléctrica negativa, lo cual induce que absorba cationes como las sales solubles, se especifica que los suelos arenosos tienen 5 meq/100, los francos de 5 a 15 y los arcillosos de 15-25 meq, es decir, una mayor conductividad eléctrica depende de igual manera de la textura (Herrero, 1985).

En la misma línea, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) puede ser un indicador de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica, para texturas de suelo arenosas se estima que el valor debe ser <9 cmol/kg, suelos francos tienen CIC entre 9 a 20 cmol/kg y los suelos arcillosos tienden a tener valores mayores de 20 cmol/kg, sin embargo, el contenido y tipo de arcilla junto con la materia orgánica alteran este indicador (Espinoza et al., 2012). Ahora bien, los resultados posteriores a los tratamientos, están sobre los 20 cmol/kg, es decir se arrojaron valores altos para este indicador, lo anterior, se deriva en mejora de las propiedades físicas del suelo, aumento en la infiltración del agua, mejora en la estructura del suelo, adicionalmente, puede explicarse por la cantidad de materia orgánica

en las muestras, puesto que aunque no se midió el indicador, la CIC se incrementa debido a la M.O. presente (Intagri S.C., 2015).

Ahora bien, el sodio intercambiable supera el 15% categoriza el suelo dentro de suelo sódico, sin embargo, para valores menores al 5% representa un suelo con pocos problemas de sodio, según los análisis posteriores a los tratamientos, se considera que todas las muestras disminuyeron sus niveles de sodio, puesto que se encuentra el PSI entre 0,89 y 3,66, presentando valores positivos para este estudio (Espinoza et al., 2012)

El RAS está altamente relacionado con la permeabilidad del suelo, este hace referencia a la proporción de los iones sodio, calcio y magnesio encontrados en el suelo, representando entonces los valores encontrados en los análisis finales de las muestras riesgo bajo de acumulación de sodio, puesto que se encuentra entre 1,34 a 4,07, es decir, la probabilidad de que se genere una dispersión de agregados y el suelo pierda su estructura y a su vez su permeabilidad, debido a la sustitución de los iones de calcio por los iones de sodio, es baja (Canovas Cuenca, 1986). Lo anterior, es ratificado con la teoría expuesta en apartados anteriores, donde se establece que el sodio concentrado en el suelo genera la dispersión y expansión de arcillas, disminuyendo la velocidad de infiltración de agua en el suelo (Amézquita et al., 2001).

También, se realiza la comparación entre PSI y CE, teniendo en cuenta la clasificación de suelos de acuerdo a su contenido de sales y sodio del IGAC (Ministerio de Vivienda & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2012), los análisis arrojaron que las muestras con los tratamientos aplicados demuestran que el PSI está por debajo del 15% para todos los suelos, adicional a esto la CE para las muestras de Sopó y Tenjo, están entre 0 a 2 dS/m, lo que indica que la clase de salinidad es normal, sin embargo, para las muestras de Tocancipá el TCF se clasifica con clase de salinidad límite y para el TSF se clasifica como ligeramente salino.

Por último, se comparan los valores anteriormente mencionados con el RAS, con ayuda de la tabla de indicadores y clases de salinidad del (Ministerio de Vivienda & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2012), lo que permite afirmar que los suelos se clasifican en límite salino debido que la CE se encuentra entre 2-4 dS/m el PSI es inferior al 15% y el RAS es menor al 13%, sin embargo, la muestra de Tocancipá a la que no se le aplicó ferrocianuro de potasio se clasifica en suelo de clase salino puesto que la diferencia radica en que la CE es mayor a 4 dS/m, por lo que tiene otra clasificación.

Para cerrar la idea, los resultados obtenidos permitieron verificar no solo que el prototipo es eficiente, sino además se sustenta en los conceptos acogidos para esta investigación: analogía biomimética y biomímesis sustentable, dentro del marco de la ingeniería ambiental, puesto que se interpreta una problemática global como lo es la salinización de suelos con una solución innovadora de acuerdo a los principios y objetivos de la biomímesis. Por consiguiente, se logra evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tenjo - Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo, permitiendo el equilibrio ecológico atendiendo a las condiciones económicas, sociales y ambientales que se derivan de la salinización de un suelo dedicado a un cultivo de flores de exportación.

11 Conclusiones

Para concluir, se estableció que los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para monitorear los suelos que presentan esta condición son pH cuyo valor previo y posterior a los tratamientos se mantuvo sobre 6; la C.E disminuyó 62%, 59% y 5% para las muestras de Sopó, Tenjo y Tocancipá TCF, sin embargo, para el tratamiento Tocancipa TSF aumentó un 101%; la C.I.C aumentó 42%, 78% y 76% para los tratamientos aplicados a las muestras de Sopo, Tenjo y Tocancipá respectivamente; por su parte el porcentaje de saturación de agua aumentó entre el 15 al 20% para cada muestra; los iones disminuyeron de la siguiente manera: sodio 73%, 94% y 86%, calcio 88%, 97% y 58% y por último el Magnesio 43%, 93% y 45%, para cada cultivo en el mismo orden ya mencionado. Se encontró también que el RAS disminuyó para las muestras de Sopó, Tenjo y Tocancipá TCF 68, 67 y 14%, sin embargo para la muestra de Tocancipá TSF aumentó un 29%; por último el PSI disminuyó 89, 95 y 89% para cada muestra respectivamente.

Se destacan los indicadores anteriormente mencionados porque son aquellos que influyen directamente sobre este proceso llevado a cabo en el suelo que como se ha mencionado puede desarrollarse de forma natural o influenciado por factores antrópicos, concluyendo que las tres muestras de suelo se clasifican como suelos con grados de salinidad ligero y muy ligero.

La adaptación del prototipo biomimético se desarrolló de forma tal que permitió no solo replicar la propuesta de Swallow & O'Sullivan, (2019), sino además ajustarla a las condiciones ambientales del suelo bajo cubierta de invernadero. De esta manera se logró identificar que los indicadores más relevantes para soportar este proyecto, cumplieron de manera satisfactoria a las condiciones requeridas por el cultivo de rosa, teniendo en cuenta que el valor de pH, C.E, CIC y PSI mejoran el crecimiento y desarrollo de la rosa, además poder ejecutar la propuesta en diferentes texturas del suelo permitió verificar su aplicación para diferentes zonas del país.

Del mismo modo, se propuso un material diferente al propuesto por los autores del estudio base mencionado, como fue la cáscara de coco y, aunque no se modificaron las proporciones de suelo y de solución de ferrocianuro aplicadas, la presente propuesta evaluó únicamente el tratamiento aplicado con resultados favorables al estudio canadiense. Sin embargo, al realizar el ajuste de este, se evidenció que, para una propuesta a una escala superior, se hace posible replicar el modelo ajustado en este proyecto con la cáscara de coco, conociendo previamente su procedencia y los lavados a los que ha sido sometida, ya que presenta un alto rendimiento en la recuperación de sales añadidas y es económicamente viable.

Adicionalmente, se concluye que el ferrocianuro es un indicador relevante en el proceso ya que refleja las sales provenientes del suelo, permitiendo verificar la cantidad de sal extraída y fortaleciendo los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio, siendo estos indispensables para demostrar que se ha efectuado el proceso de capilaridad y evapotranspiración por medio de los materiales implementados.

La alternativa promisoría para recuperación de suelos salinos de cultivo de flores bajo condiciones de invernadero se basó en el desarrollo de un prototipo innovador en Colombia desde la ingeniería ambiental, dando relevancia a que como se mencionó a lo largo del documento, recuperar este tipo de

suelos presenta un reto para la tecnología actual, considerando las técnicas ya establecidas y normalizadas especialmente para este tipo de cultivos. El prototipo demostró ser sustentable y eficiente, a partir del conocimiento de la fisiología vegetal de las plantas vasculares, del funcionamiento del sistema interno de las plantas y de la posibilidad de su replicación sin la necesidad de una planta que se encargue del proceso.

Finalmente, se concluye que la importancia de la biomimesis en la ingeniería ambiental radica en la generación de una perspectiva distinta ante las problemáticas de carácter ingenieril, no solo desde el enfoque antrópico sino analizando la eficiencia de los sistemas naturales y emulando los procesos realizados por estos, lo cual genera soluciones eficientes, sustentables y económicamente viables, que impulsan la economía circular dentro del marco de los objetivos de desarrollo sostenible, teniendo en cuenta que al recuperar los suelos salinos se asegura la producción económica, social y ambiental, reduciendo la huella ecológica a través del cambio en la forma de producción y consumo de este recurso natural, conservando a su vez la biodiversidad y el equilibrio ecosistémico, demostrando fundamentalmente la eficiencia de la producción de cultivo de rosa basado en la recuperación del suelo salino generado de forma antrópica.

12 Recomendaciones

Con el fin de seguir adelantando estudios en esta propuesta promisoriosa en el país, es necesario adelantar un estudio de impacto ambiental del uso de la cáscara de coco (material absorbente escogido), puesto que se tuvo en cuenta que es un material que se utiliza en los cultivos de rosa al igual que la cascarilla de arroz como sustrato, sin embargo, pueden evaluarse otros materiales que también puedan simular el proceso de las plantas vasculares y su impacto ambiental sea menor. Adicionalmente debe evaluarse el componente económico a mayor profundidad tanto para el cultivo de rosa como para el productor de coco debido a que los costos de este proyecto no equivalen a una aplicación a gran escala.

Adicionalmente, se recomienda probar en condiciones de campo real siguiendo la metodología propuesta el montaje que se realizó sin ferrocianuro de potasio, pues, aunque se demostró que con este el proceso es más evidente y los indicadores de salinidad variaron de forma favorable, sin añadir este inhibidor también se demostró cierto grado de efectividad, teniendo en cuenta que el estudio base de Swallow & O'Sullivan tuvo resultados para condiciones de laboratorio que simulaban las características del entorno real, mientras este estudio aunque tuvo resultados muy buenos, no se evaluaron condiciones como temperatura y viento dentro del sistema.

En efecto de aprobar esta propuesta y aplicarla a gran escala es necesario tener en cuenta el nivel freático, y la profundidad de las raíces del cultivo en que se aplique, así no se incurrirá en la necesidad de tener un material que transporte el agua ajeno al sistema productivo; también es válido comparar la eficiencia del proceso biomimético, el lavado del suelo y la fitorremediación, teniendo en cuenta los criterios de selección de la planta y el tiempo de aplicación, así como el costo-beneficio que traería la aplicación de cada uno de los procesos con el fin de seleccionar la metodología que represente mayor sostenibilidad. También es necesario demostrar que el cultivo que se encuentre en desarrollo al momento de la aplicación del tratamiento no tiene variación alguna.

13 Referencias bibliográficas.

- Agromática. (2014). *Fibra de coco, un sustrato con gran potencial*. Agromática. <https://www.agromatica.es/sustrato-de-fibra-de-coco/>
- Aguas Bucheli, L. F. (2016). *Estadística: Prueba de Tukey*. SlideShare.net. <https://www.slideshare.net/LuisFerAguas/estadistica-prueba-de-tukey>
- Amézquita, E., Barrera, L., Burbano, H., Clavijo, J., Espinosa, J. A., García, A., Guerrero, R., León, A., Lora, R., Malavolta, E., Muñoz, R., Villar, H., & Zapata, R. (2001). Fertilidad de Suelos. Diagnóstico y Control. En F. Silva Mojica (Ed.), *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos* (Segunda Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4922/1/216.1.pdf>
- Ascolflores. (2020). *Sostenibilidad*. Pilares de Gestión. <https://ascolflores.org/es/sostenibilidad/>
- Auchmoody, L. R., & Walters, R. S. (1988). Revegetación de un sitio de bosque salmuera-muertos. *Soil Sci. Soc. A.m. J.*, 1.
- Ayala Flores, G., Taquirichi Fernández, L., & Nuñez Yupanqui, D. (2009). *Recuperacion de suelos salinos mediante cultivo Qawchi*. Secretaría Departamental de Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (S. L. Madrid: McGraw-Hill - Interamericana de España (ed.); 2a ed.).
- Balboa C., C. H., & Domínguez Somonte, M. (2014). Circular economy as an ecodesign framework: the ECO III model. *Informador Técnico*, 78(1), 82. <https://doi.org/10.23850/22565035.71>
- Benyus, J. M., & Garcia Leal, A. (1997). *Biomimesis, innovaciones inspiradas por la naturaleza* (Ediciones Díaz de Santos S.A. (ed.)).
- Bernal Figueroa, A. A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 245. <https://doi.org/10.22490/21456453.1340>
- Bidwell, R. (1990). *Fisiología Vegetal*. (AGT Editor SA (ed.)).
- Biomimetic Sciences Institute. (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. <https://biomimeticsscience.org/es/sobre-nosotros-3/ods/>
- Biomimicry Institute. (2018). *What Is Biomimicry?* <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>
- Cádenas Poveda, L. M., & Rodríguez Espejo, M. Y. (2011). *Estudio de la agroindustria de las flores en Colombia y la creación de una empresa productora de flores*. Universidad de La Sabana.
- Calvachi Zambrano, B. (2012). Los ecosistemas semisecos del altiplano cundiboyacense, bioma azonal singular de Colombia, en gran riesgo de desaparición. *Revista Mutis*, 2(2), 26–59. <https://doi.org/10.21789/22561498.364>
- Canovas Cuenca. (1986). Calidad Agronómica de las agua de riego. En *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. <https://www.gipuzkoa.eus/documents/2227195/2228975/recomencriteriosdeinterpretacionaguas.pdf/c52b6626-2092-ca14-e596-f189dd8eef9b>
- CAR. (2015). *Diagnóstico salinización jurisdicción CAR* (Número 36). <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b903f4fa4d1e.pdf>
- Carretero Montero, C. L. (2002). *TOLERANCIA A LA SALINIDAD DE PLANTAS DE MANDIOCA (Manihot esculenta Cranz): INFLUENCIA DE LA MICORRIZA*. Universidad de Sevilla.
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). ECONOMÍA CIRCULAR. *Economía Industrial*, 401, 11–20. <http://www.minetad.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CERDÁ y KHALILOVA.pdf>
- Clavijo Rios, C., Rojas Rojas, J. E., Gomez Bello, S. A., López Téllez, E., Torres Osma, R. E., & Ríos

- Salcedo, J. (2018). *Diagóstico y monitoreo de degradación de suelos por salinización en la cuenca río Garagoa - subcuenca río Machetá - Jurisdicción CAR a escala 1:25.000*. <http://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=16632>
- Congreso de la Republica. (2004). Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En *Diario Oficial No. 45.628 de 2 de agosto de 2004* (p. 1). http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_civil_pr046.html%0Ahttp://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_2811_1974.html%0Ahttp://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1733_2014.html%0Ahttp://www.secretariasenado.gov.c
- Courel, G. (2019). Guía de estudio. Suelos Salinos y Sódicos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- DANE. (2010). *INFORME DE RESULTADOS Censo de Fincas Productoras de Flores En 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca 2009*.
- DNP. (2018a). *Sopó, Cundinamarca*. Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2018b). *Tenjo, Cundinamarca*. Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2018c). *Tocancipá, Cundinamarca*. Departamento Nacional de Planeación.
- Drechsel, P., Noble, A., Murtaza, G., Nangia, V., Qadir, M., Quillérou, E., . . . Thomas, R. (28 de Octubre de 2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum A United Nations Sustainable Development Journal*, 282-295.
- Espinoza, L., Slaton, N., & Mozaffari, M. (2012). Agricultura y Recursos Naturales Como Interpretar los Resultados de los Análisis de Suelos. *División of agriculture Research and Extension*, 2. <https://www.uaex.edu/publications/pdf/fsa-2118sp.pdf>
- FAO. (2015). *Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- FAO. (2016). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Técnico. En L. Caon, N. Forlano, C. Keene, M. Sala, A. Sorokin, I. Verbeke, & C. Ward (Eds.), *Fao*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- FAO. (2020). *International Year of Plant Health 2020*. FAO. <http://www.fao.org/plant-health-2020/home/es/>
- Franco Ariza, H. E. (2017). *Evaluación de la actividad fitorremediadora de Baccharis latifolia (Ruiz & Pav.) Per en suelos contaminados con metales pesados en la cuenca alta del río Bogotá. Villapinzón (Cundinamarca)*. Universidad El Bosque.
- García Y., Ramírez W., & Sánchez S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0864-03942012000200001
- Girón Pinto, J. D. (2019). Evaluación documental de los métodos de restauración de suelos salinos, con influencia en el distrito de riego Usochicamocha, departamento de Boyacá [Universidad de La Salle]. En *Ciencia Unisalle*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1170
- Global Engitech. (2014). *Definición de ingeniería*. Global Engitech. <https://globalengitech.wordpress.com/2014/06/05/definicion-de-ingenieria/>
- Gobernación de Cundinamarca. (2006). *División provincial de Cundinamarca [mapa], edición 2006, 1:1000000*.
- Gómez-Cruz, N. A., & Maldonado, C. E. (2011). Sistemas bio-inspirados: un marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos. *Ingeniería de sistemas complejos. Compilación de las conferencias presentadas en la Cuarta Asamblea de la Red Cartagena de Ingeniería*, 112. <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/3320/Fascículo112.pdf?sequence=1>

- Hernández Gil, R. (2002). *Translocación por el Xilema*. LibroBotanicaOnline. http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/translocacion_xilema/index.html
- Herrero, J. (1985). *SALINIDAD EN LOS SUELOS: ASPECTOS DE SU INCIDENCIA EN REGADIOS DE HUESCA*. (Cometa S.A (ed.)).
- IDEAM, CAR, & UDCA. (2017). *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización*. IDEAM. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023685/Protocolo_salinizacion.pdf
- Infoagro Systems S.L. (2010). *Agricultura. El cultivo de las rosas para corte. 1ª parte*. <https://www.infoagro.com/flores/flores/rosas.htm>
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. (2015). *La Salinidad en la Agricultura*. Agrosal. <http://agrosal.ivia.es/>
- Intagri S.C. (2015). *La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo*. Intagri.
- Jiménez Iguarán, N., & Ramírez, O. J. (2016). Biomímesis: una propuesta ética y técnica para reorientar la ingeniería por los senderos de la sustentabilidad. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 155–166.
- Li, Y., Zheng, L., Zhang, Y., Liu, H., & Jing, H. (2019). Comparative metagenomics study reveals pollution induced changes of microbial genes in mangrove sediments. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42260-4>
- López-Forniés, I., & Berges-Muro, L. (2014). Aproximación al diseño biomimético. Aprendizaje y aplicación. *DYNA (Colombia)*, 81(188), 181–190. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.41671>
- López-Portillo, A. (2010, diciembre 9). *Biomimesis: una nueva vieja ciencia*. BBC Mundo. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2010/12/101209_biomimesis
- Machín Armas, F. O., Céspedes Montano, S. G., Riverón Mena, A. N., & Fernández Santiesteban, E. (2017). Sostenibilidad, ingeniería y enseñanza de las ciencias básicas. Marco teórico conceptual. En *Revista Iberoamericana de Educación* (Vol. 73). <https://rieoei.org/historico/documentos/rie73a08.pdf>
- MADS. (2015). Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - EVA - Función Pública. *Función Pública*, 1–619. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Merino, J. (2009). *Definición de ingeniería ambiental*. Qué es, Significado y Concepto. <https://definicion.de/ingenieria-ambiental/>
- Milione, G. M. (2019). Salinización y otros cambios hidrogeoquímicos asociados a distintos usos del suelo en la Región Centro-Sur bonaerense, Argentina. (*Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata*). <https://doi.org/10.35537/10915/75825>
- MinAmbiente. (2016). *Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo*. https://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/Consulta_Publica/Politica-de-gestion-integral-del-suelo.pdf
- Ministerio de Vivienda, C. y T., & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2012). *Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de los 14 municipios de la Sabana de Bogotá, departamento de Cundinamarca, escala 1:10.000*. <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/37174>
- Minitab. (2018). *Uso de comparaciones múltiples para evaluar las diferencias en las medias de grupo*. Support Minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/multiple-comparisons/using-multiple-comparisons-to-assess-differences-in-means/>
- Minitab. (2020). *¿Qué es el método de Tukey para comparaciones múltiples?* Soporte de Miniab 18. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling->

- statistics/anova/supporting-topics/multiple-comparisons/what-is-tukey-s-method/
- Moreno De Luca, L., Galvis Chacón, M. J., & García, R. J. (2012). BIOMÍMESIS EN ARQUITECTURA E INGENIERÍA ESTRUCTURAL. *Revista M*, 9(1), 78. <https://doi.org/10.15332/rev.m.v9i1.973>
- Osorno Reyes, J. C., & Salas Garcia, J. F. (1987). *Respuesta de cinco especies vegetales a niveles de salinidad y sodio en suelos del Centro Agropecuario Marengo*. Universidad Nacional de Colombia.
- PNUD. (2020a). *Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/sustainable-development-goals/goal-15-life-on-land.html>
- PNUD. (2020b). *Objetivo 2: Hambre cero*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-2-zero-hunger.html>
- Quintero, M., Guzmán, J., & Valenzuela, J. (2012). Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavel (*Dianthus caryophyllus* L.). *REVISTA COLOMBIANA DE CIENCIAS HORTÍCOLAS*, 6(1), 76–87.
- Real Academia de Ingeniería. (2020). *Biomímesis*. <http://diccionario.raing.es/es/lema/biomimesis>
- Riechmann, J. (2004). Biomímesis: Un Concepto Clave para Pensar la Sustentabilidad. *El Ecologista*, 1–11.
- Rosas Sanchez, A. (2008). *INFLUENCIA DE LA FERTILIZACIÓN ORGANICA E INORGANICA EN LA PRODUCCION DE ROSAS Y SALINIDAD* [Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4988/T16878> ROSAS SANCHEZ, ALEJANDRO TESIS.pdf?sequence=1
- Ruben. (2016). *Cuáles son las mejores condiciones de suelo para el cultivo de rosas Fertilizantes y Suelos*. Flor de Planta. <https://www.flordeplanta.com.ar/fertilizantes-suelos/cuales-son-las-mejores-condiciones-de-suelo-para-el-cultivo-de-rosas/>
- Service-USDA, U. S. D. of A. N. R. C. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. En *Mdp.Edu.Ar* (12a ed.). https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Shahid, S. A., Abdelfattah, M. A., & Taha, F. K. (2013). *Developments in soil salinity assessment and reclamation: innovative thinking and use of marginal soil and water resources in irrigated agriculture*. Springer Science & Business Media.
- SIAC. (2015). *Degradación de suelos por salinización*. Sistema de Información Ambiental de Colombia. <http://www.siac.gov.co/salinizacion>
- Somos Cundinamarca. (2012). *La Sabana de Bogotá*. <http://somoscundinamarca.weebly.com/la-sabana-de-bogotaacute.html>
- Swallow, M. J. B., & O’Sullivan, G. (2019). Biomimicry of vascular plants as a means of saline soil remediation. *Science of the Total Environment*, 655, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.245>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2003). *Plant physiology*. Sunderland: Sinauer Associates.
- Tamayo Orbeagozo, U., & Vargas, G. (2020). Biomimesis y consumo responsable. En *Re-descubriendo el mundo natural. La biomimesis en perspectiva* (pp. 37–60). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/4061>
- Xiong, J. (2015). *Recuperación y rehabilitación de suelos aplicación de enmiendas y el establecimiento de contaminados con elementos traza mediante la una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (Paulownia fortunei)*. [Universidad De Sevilla]. <https://doi.org/10.261/129634>
- Zerki, S., Albisu, L. M., Aragues, R., & Herrero, J. (1990). Impacto económico de la salinidad de los suelos en la agricultura de Bárdenas I. En Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias &

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (Eds.), *Comunicaciones INIA* (Vol. 36).
http://digital.csic.es/bitstream/10261/33552/1/HerreroJ_ComINIA_1990.pdf

Zúñiga Escobar, O., Osorio Saravia, J. C., Cuero Guependo, R., & Peña Ospina, J. A. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 64(1), 5769–5779.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/26378>

14 Anexos:

14.1 Anexo 1. Mapa de Colombia zonificado por susceptibilidad a degradación por salinización

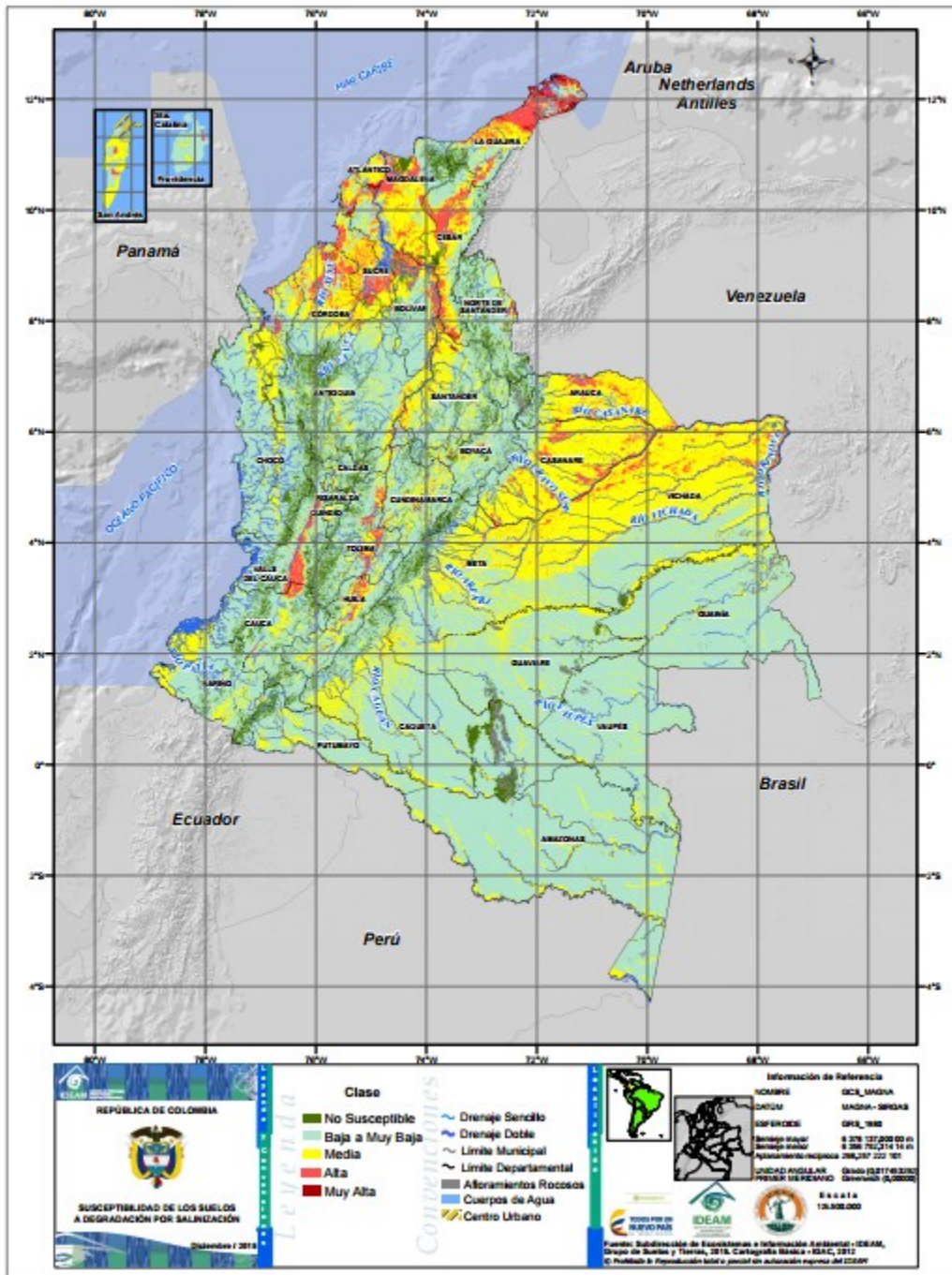


Figura 28. Mapa de susceptibilidad a la degradación de suelos por salinización, E: 1:100.000. IDEAM, CAR, &U.D.C.A, (2017)

14.2 Anexo 2. Zonas susceptibles a degradación por salinización en Colombia

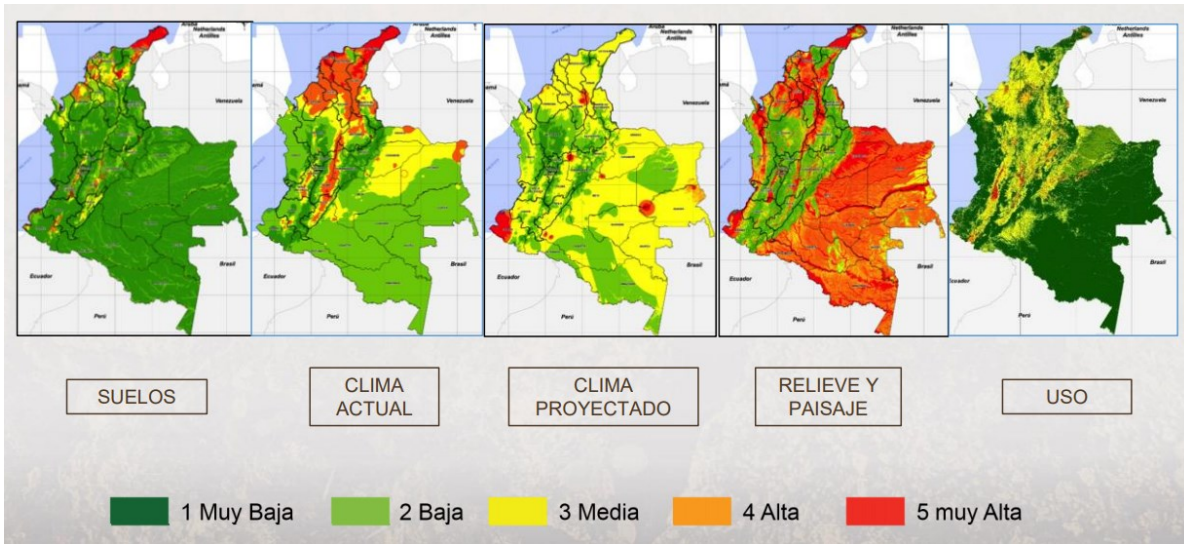


Figura 29. Zonas susceptibles a la degradación de suelos por salinización por diversos factores. Fuente IDEAM, CAR, & UDCA, (2017)

14.3 Anexo 3. Plan de trabajo-Cronograma

Objetivo General	Objetivos específicos	Actividades	2020-1		2020-2				2021-1		Costo de la actividad			
			Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep		Oct	Nov	Dic
Evaluar la reducción de la salinidad en suelos dedicados a la producción de rosa en la Sabana de Bogotá (Tenjo - Tocancipá), por medio del prototipo biomimético del proceso capilar de las plantas vasculares como alternativa de recuperación del suelo.	Seleccionar los indicadores edafológicos de salinidad, sensibles al manejo y condiciones ambientales para su monitoreo.	Consulta bibliográfica	█										\$ 50.000	
		Establecer los posibles lugares de adquisición de muestras para su posterior recolección.	█										\$ 40.000	
	Adaptar el prototipo biomimético propuesto por Swallow, M. J., & O'Sullivan, G (2019) en suelos salinos.	Realizar los correspondientes análisis de los indicadores de salinidad para determinar el grado de afectación de	█										\$ 100.000	
		Identificar los indicadores de mayor relevancia para ser remediados por el método biomimético.	█										N/A	
		Elegir los mejores materiales para la realización del montaje.	█	█										\$ 40.000
	Correlacionar el prototipo biomimético de capilaridad con los indicadores de salinidad del suelo, a modo de alternativa promisoría de recuperación sostenible	Determinar las condiciones y reactivos que pueden ayudar al proceso de remediación.	█	█										\$ 40.000
		Realizar triplicados del montaje final para mejorar la aproximación de resultados.	█	█										\$ 50.000
		Ejecutar los ensayos para la determinación evaporación de agua y formación de cristales de sal	█	█										\$ 1.200.000
		Comparar los indicadores iniciales escogidos con los nuevos obtenidos.	█	█										
		Evauar estadísticamente los resultados obtenidos de todos los tratamientos	█	█										
Justificar los resultados obtenidos de los procesos de reducción de sales dados por el montaje.	█	█												

	Sin realizar
	Realizando
	Realizado

14.4 Anexo 4. Presupuesto

Concepto	Solicitud a la universidad	Valor
Material bibliográfico e insumos informáticos	X	\$ 50.000
Materiales prototipo		\$ 30.000
Materiales simulación		\$ 100.000
Reactivos simulación	X	\$ 10.000
Análisis de laboratorio		\$ 1.250.000
Envío de muestras de suelo		\$ 30.000
Investigador	X	\$ 2.788.000
Director de proyecto	X	\$ 900.000
Total parcial		\$ 5.158.000
Rubros (15%)		\$ 676.200
Total proyecto		\$ 5.931.700

Nota: Adicional a este documento se adjuntan las bitácoras, análisis de laboratorio y resultados estadísticos que soportan los resultados expuestos anteriormente como anexos.