



Restauración de costras biológicas del suelo: pasado, presente y futuro

Soil biologic crusts restoration: past, present and future

ANA LAURA NAVAS ROMERO^{1,2*}, EDUARDO MARTÍNEZ CARRETERO²
Y MARIO HERRERA MORATTA^{2,3}

¹ Instituto de Ingeniería Química - Facultad de Ingeniería (UNSJ) - Grupo Vinculado al PROBIEN (CONICET-UNCo), San Juan, Argentina

² Instituto Argentino de Investigaciones en Zonas Áridas. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Mendoza, CP 5500, Argentina

³ Instituto de Biotecnología-Facultad de Ingeniería (UNSJ)

*<anavas@mendoza-conicet.gob.ar>

RESUMEN

El presente trabajo resume los aspectos más importantes sobre la restauración de costras biológicas del suelo (CBs), incluyendo los factores más determinantes en el éxito de una restauración, los aspectos a tener en cuenta para seleccionar especies y las técnicas más empleadas, con el fin de servir como base para quienes desean llevar a cabo proyectos de recuperación de CBs. Se propone una serie de pasos con sus recomendaciones de acuerdo al área y condiciones a restaurar, donde se destaca la importancia de la identificación del sitio a cosechar, la colecta, el almacenamiento y la inoculación en laboratorio o en campo. Finalmente se enumeran las técnicas de enriquecimiento y estabilización más usadas en los procesos de restauración de CBs. Cada aspecto considerado está avalado por múltiples experiencias con resultados ampliamente probados. En el momento de seleccionar las estrategias más adecuadas pueden surgir imposibilidades económicas que llevarán por otra vía. Independientemente de las estrategias abordadas, el camino seleccionado será el que asegure el mejor éxito posible en la restauración.

ABSTRACT

This work summarizes the most important aspects of restoration in biological soil crusts (BSC), including the most determining factors in the success of a restoration, the aspects to take into account to select species and the techniques most used in their restoration, in order to serve as base for those who wish to carry out BSC's restoration projects. A series of steps with their recommendations according to the area and conditions to be restored are proposed, where the importance of identifying the site to be harvested, the collection, storage and inoculation in the laboratory or in the field are highlighted. Finally, the enrichment and stabilization techniques most



used in the restoration process of BSC are listed. Each aspect considered is supported by multiple experiences with widely proven results. At the moment of selecting the most appropriate strategies can emerge economic impossibilities that will lead for another path. Regardless of the strategies addressed, the selected path will be the one that ensures the best possible success in restoration.

Palabras clave: restauración, inoculación, costras biológicas, perturbación

Keywords: restoration, inoculation, biological soil crust, disturbance

INTRODUCCIÓN

Las costras biológicas del suelo (CBs) son comunidades formadas por la íntima asociación entre algas, hongos, musgos, líquenes y cianobacterias, entre otros, agregados con partículas de suelo, que habitan la capa superficial del suelo en ecosistemas de tierras secas (Belnap et al., 2016; Navas et al., 2020). Son componentes críticos de estos ecosistemas, proporcionan importantes servicios ecológicos, estabilizan el suelo, regulan el ciclo del agua y los nutrientes, amortiguan las temperaturas del suelo e influyen en el establecimiento de plantas vasculares (Weber et al., 2015; Seitz et al., 2017; Navas et al., 2019). Las CBs son particularmente sensibles a las alteraciones y, una vez que esto ocurre, son lentas para restablecerse dejando suelos propensos a la erosión, pérdida de nutrientes e invasión de plantas (Weber et al., 2016; Chamizo et al., 2017). Las CBs pueden restablecerse después de una perturbación, pero se dañan fácilmente al pisotearlas cuando son pequeñas y aún están débilmente adheridas al suelo (Slate et al., 2020). Por lo tanto, los efectos negativos de la alteración de las CBs sobre la función del ecosistema pueden ser duraderos sin una restauración activa. El reconocimiento de la importancia ecológica de las CBs ha aumentado el interés en desarrollar estrategias que aceleren su recuperación,

pero las técnicas disponibles siguen siendo limitadas (Bowker, 2007; Chiquoine, 2012).

La restauración de las CBs es un proceso lento que, dependiendo del tipo de perturbación, puede requerir décadas, y más aún si la perturbación es tan grande como para no dejar propágulos en el suelo (Bowker, 2007). Sin embargo, la inoculación de CBs reduce el tiempo de recolonización haciendo que el proceso de establecimiento de CBs y la recuperación de sus funciones ecosistémicas comience rápidamente (Yang et al., 2014). La rehabilitación de las CBs debe realizarse principalmente para restaurar la función del ecosistema y no de las CBs *per se* (Bu et al., 2018; Bowker et al., 2020; Rosentreter, 2020). A pesar de la importancia reconocida de la restauración de CBs y sus funciones en los sistemas áridos, la información sigue siendo escasa, dispersa, contradictoria y no permite una elección clara de métodos y técnicas adecuadas para cada sitio en particular. El objetivo del presente trabajo es resumir los aspectos más importantes sobre la restauración de CBs, destacar los factores que más influyen en el proceso y comentar las técnicas más empleadas en su restauración, para que sirva de base en proyectos de restauración que impliquen el empleo de CBs. Finalmente se propone una serie de pasos con sus recomendaciones de acuerdo al área y condiciones a restaurar.

TIPOS DE RESTAURACIÓN

Al igual que sucede con las plantas vasculares, para las CBs se pueden identificar dos tipos de restauración: restauración pasiva y restauración activa.

Restauración pasiva

Este método implica dejar que la naturaleza actúe y el sistema se recupere luego de una perturbación sin realizar ningún tipo de intervención antrópica. La restauración pasiva de CBs, implica esperar que los propágulos de CBs se instalen de manera natural en los sitios perturbados (Warren et al., 2018). Este método tiene gran potencial (Condon et al., 2020). Se sabe que el proceso es episódico y se basa en la deposición estacional, en cantidades suficientes de los componentes de las CBs y en la temporada adecuada. Muchas especies de las CBs tienen esporas que están presentes en el viento y pueden inocular sitios. Muchas briófitas, que se reproducen por esporas pequeñas, son tolerantes al estrés y se consideran agresivas para colonizar un sitio sin una inoculación activa (Weber et al., 2016). Otras especies de las CBs tienden a reproducirse localmente por fragmentación vegetativa o por propágulos asexuales (Chiquoine et al., 2016; Condon & Pyke, 2016; Zhao et al., 2016). Generalmente, la sucesión en las CBs comienza con las cianobacterias, que proporcionan estabilización inicial del sistema perturbado, luego líquenes y por último musgos (Chiquoine, 2012). El principal problema de una restauración pasiva es que los organismos de las CBs pueden requerir períodos de tiempo largos, y condiciones ambientales favorables, para regenerarse o recuperarse (Belnap & Rosentreter, 2001). Sin embargo, la litera-

tura ha subestimado y sobreestimado su recuperación (Belnap & Eldridge 2001). Belnap (1993) encontró que después de 2 y 5 años de perturbación en un área, las cianobacterias se recuperaban de manera natural. Anderson et al. (1982) encontraron que, en muchos sistemas áridos, las técnicas de restauración pasiva como la exclusión del ganado o la restricción de vehículos todo terreno puede permitir el restablecimiento rápido de las CBs (2-3 años) y regresar a un estado similar al ecosistema preexistente. Sin embargo, en algunos sistemas, la recuperación no se produce de forma pasiva (Belnap & Warren, 1998). Callison et al. (1985) no observaron recuperación de CBs después de 37 años en una comunidad de matorrales y Condon et al. (2020) tampoco después de 80 años de exclusión de pastoreo.

Restauración activa

En los ecosistemas de tierras secas, la recuperación natural de las CBs después de la perturbación puede ser lenta o inhibida, lo que requiere prácticas de restauración activas (Chiquoine, 2012). Una recuperación activa implica realizar algún tipo de intervención antrópica en el sistema perturbado que no solo resulta de retirar la perturbación, sino de llevar a cabo actividades tendientes a acelerar la recuperación de las CBs. En algunos casos la restauración activa es el único tratamiento que genera cobertura de líquenes y musgos (Chiquoine, 2016; Chandler et al., 2019). Este tipo de restauración puede involucrar, dependiendo del sitio, disponibilidad de tiempo, material, personal, dinero y la cosecha o el cultivo de CBs. Asimismo, cualquiera sea la estrategia se puede requerir de técnicas adicionales como aumento de

humedad del suelo, nutrientes esenciales o sustratos que ayudan con el crecimiento, la recuperación y la sostenibilidad de las CBs (Davidson et al., 2002; Chiquoine, 2012). A pesar de las limitaciones y riesgos, la restauración activa es considerada la más adecuada en la mayoría de los sistemas áridos dada su sensibilidad, baja capacidad para recuperarse de una perturbación y las extremas condiciones climáticas reinantes. Este tipo de técnica permite obtener una recuperación del sistema en menos tiempo tanto de cobertura de CBs como de funciones ecosistémicas, siendo posible obtener una evaluación a corto y mediano plazo.

Ante la complejidad de las diversas técnicas, este trabajo se centra en la restauración activa de las CBs.

RESTAURACION CON CBs

Cosechar vs. Cultivar la CBs

Antes de comenzar el proceso de restauración activa se debe decidir qué tipo de estrategia se va a seguir. La restauración activa de CB puede implicar la obtención de CBs de un sitio no alterado y usar el material como inóculo en áreas degradadas, o cultivar organismos en laboratorio para su aplicación en el campo (Hu et al., 2002).

Cosecha de CBs: La cosecha consiste en recolectar las CBs de un área, para su almacenamiento y traslado a otro sitio que requiere de restauración. El sitio de cosecha de CBs puede consistir en comunidades de contacto al sitio perturbado, o de un área que va a sufrir una perturbación y donde las CBs pueden en cierto sentido ser rescatadas. Esta técnica tiene la ventaja de que las CBs se adaptan mejor a las condiciones (meso y micro) climáticas y se evita la aleatoriedad de

probar organismos. La CBs recuperada contiene el complemento completo de especies presentes en la CBs. Además, el material recuperado puede contener especies que son difíciles de cultivar en laboratorio o de aplicar en campo (Stark et al., 2014). Sin embargo, las operaciones de salvamento pueden ser desafiantes y tener un costo prohibitivo, el material de origen puede ser difícil de localizar, y superficies importantes a restaurar requieren grandes cantidades de CBs. Si el material recolectado no se usa inmediatamente en la restauración del sistema, es necesario el almacenamiento adecuado y su preparación para la aplicación en el campo (Alpert, 2000; Lüttge et al., 2011). Además, las CBs pueden tener dificultades para restablecerse si las propiedades del suelo se alteran significativamente debido a la perturbación.

Aunque el salvamento tiene desventajas, aprovechar las oportunidades para salvar material es ventajoso. El simple hecho de recolectar <2 cm de CBs, desmenuzarlo y rociarlo sobre el área que necesita rehabilitación, a menudo puede promover su restablecimiento (Bowker et al., 2007; Zhao et al., 2016; Antoninka et al., 2018). Si bien la recolección de CBs, que de otro modo permanecerían intactas y sin perturbaciones, para satisfacer la demanda de restauración no es sostenible, cuando se usa CBs rescatada de lugares que están programados para ser alterados, no recolectar la CBs resultará en una oportunidad perdida (Antoninka et al. 2018; Giraldo-Silva et al., 2019). Incluso cuando los métodos de cultivo se mejoran drásticamente, el cultivo seguirá necesitando como material de origen CBs intacta. Por lo tanto, el rescate puede representar un enfoque complementario, incluso si el cultivo se convierte en una

solución a mayor escala. Si bien el rescate y el uso posterior de CBs ofrece muchas oportunidades de restauración interesantes, también existen riesgos, como al mover CBs de un lugar a otro, que puede implicar el movimiento de organismos o enfermedades indeseables. El conocimiento del sitio de recolección podría ayudar a sopesar los riesgos y beneficios potenciales (Ayuso et al., 2017; Bethany et al., 2019).

Este tipo de estrategias debe realizarse con el cuidado de no afectar un sitio no alterado y no incluido en el área programada. Colectar CBs en un área no alterada para ensayos a pequeña escala, tiene un impacto ambiental mínimo. Sin embargo, para restaurar superficies grandes, sacrificar la CBs intacta no es sostenible y se opone a una regla de conservación de CBs: “no rompas la CBs”. La perturbación asociada con la eliminación de CBs intacta puede causar una cascada de perturbaciones en el ecosistema, como la pérdida de suelo (Eldridge & Leys, 2003) y la creación de parches de suelo desnudo vulnerable a la erosión o colonización por plantas invasoras (Hernández & Sandquist, 2011). Debe tenerse en cuenta que la recuperación de la CBs es un proceso lento y de mediano/largo plazo en zonas áridas (Belnap et al., 2016).

La cosecha de las CBs debe realizarse disminuyendo al máximo la pérdida de material. Esto implica establecer de antemano la cantidad a colectar de CBs de manera que sea la mínima adecuada para lograr una inoculación efectiva produciendo el mínimo impacto posible. Dicha cantidad estará supeditada a la capacidad de traslado y almacenamiento posterior. Si la cosecha se realiza en sistemas que no van a ser perturbados con posterioridad, la colecta debe ser míni-

ma y en lugares que garanticen la pronta recuperación del sistema. Así, en términos generales, se recomienda colectar bajo parches de vegetación. En caso de colectar en áreas abiertas, esto debe realizarse en sitios con gran cobertura de CBs y solo sobre CBs dominantes, evitando realizarse en áreas contiguas. La época recomendada de colecta es cuando las CBs se encuentran secas, dado que en estas condiciones la actividad es mínima y los organismos se encuentran concentrados en la parte superior del suelo (Bowker et al., 2020). La cosecha debe realizarse siempre tomando la capa superficial de suelo entre los 0-5 cm de profundidad (Doherty, 2014). La extracción debe realizarse de la manera más cuidadosa posible, evitando romper el pan de tierra y siguiendo el mismo protocolo que se detalla más adelante para la colecta. Previo a la recolección, el área a extraer debe humedecerse y luego con la ayuda de una espátula extraer la muestra de CBs. Para colectar se raspa la parte superficial con herramientas de mano como palas y espátulas. El diámetro de la muestra a colectar recomendado varía entre 2 y 5 cm, tamaños superiores se fragmentan fácilmente (Chock et al., 2019). Inmediatamente extraída debe resguardarse en sobres de papel para su traslado y etiquetarse adecuadamente (Fick, 2020). Cuando se cosechan grandes cantidades, el material de CBs se colecta con palas grandes, se trabaja también de forma manual y siempre comprobando que la profundidad a la que se retire el material sea entre los 2-3 cm de profundidad (Chiquoine et al., 2016). No deben humedecerse posteriormente a su colecta, debido al riesgo de invasión de hongos. La identidad de las especies colectadas debe confirmarse

en laboratorio con base en la determinación microscópica de caracteres taxonómicos (Doherty, 2014). Cualquiera sea la ocasión, el material colectado debe almacenarse en sobres de papel luego de secarse al aire, y mantenerse en oscuridad a temperatura ambiente o inferior a los 20 °C (**Figura 1** A-C) (Velasco Ayuso et al., 2020). No prensarse antes de su resguardo definitivo.

Cultivo de CBs: El cultivo de CBs consiste en cosechar una ínfima cantidad de CBs y multiplicarla en laboratorio en grandes cantidades para su posterior inoculación en campo. Varios estudios sugieren la eficacia del cultivo de especies de CBs como herramienta de restauración (Bu et al., 2014; Zhao et al., 2016). El cultivo proporciona una alternativa a la localización de grandes cantidades de material de origen. Además, se pueden seleccionar especies para cultivar y aplicarse a campo estratégicamente para guiar a las comunidades de CBs con di-

ferentes objetivos como estabilización del suelo o secuestro de carbono. Para los ensayos a pequeña escala, este enfoque tiene un impacto ambiental mínimo. (Eldridge & Leys, 2003; Hernández & Sandquist, 2011). Es importante desarrollar inóculos específicos para el sitio, y asegurar que se minimicen los cambios en la composición de la comunidad. La calidad de un inóculo cultivado en vivero en términos de su potencial para promover la formación de CBs en la naturaleza dependerá en gran medida de la presencia de poblaciones robustas y viables de tales especies pioneras y debe ser probada también en campo (Velasco Ayuso et al., 2017). Las técnicas de cultivo presentan la deficiencia de producir un inóculo aclimatado a condiciones óptimas de laboratorio y con suficiente aporte de nutrientes; inóculo que puede ser de baja aptitud en el suelo, particularmente si se utilizan cepas estándar que pueden resultar subóptimas para el

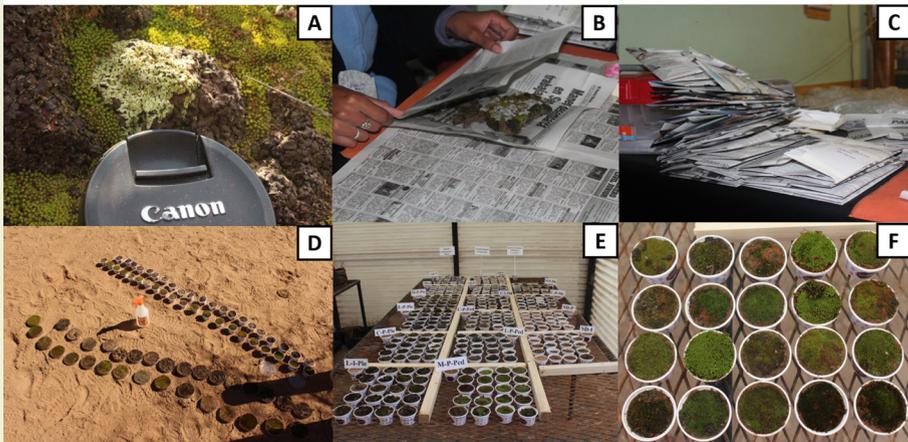


Figura 1. A-D: Colecta de costras biológicas del suelo, B-C: Almacenado, E-F: Cultivo en invernadero

Figure 1. A-D: Collection of soils biological crusts, B-C: Stored, E-F: Culture in greenhouse

clima local y para las propiedades edáficas del sitio. La inoculación activa de cepas autóctonas puede provocar el riesgo de una introducción no intencional de especies invasoras. Además, requiere instalaciones, equipos, recursos y tiempo adecuados para producir grandes cantidades de material en condiciones ambientales controladas, y no todas las especies se cultivan fácilmente y de igual manera en condiciones de laboratorio. Algunas especies que se cultivan fácilmente no sobreviven en condiciones de campo sin tiempo y recursos adicionales para su adaptación, o debido a diferencias en las condiciones del suelo y ambientales (Doherty, 2014; Stark et al., 2014). El material de origen también es importante para el cultivo porque la variación dentro de las especies puede ocurrir a través de gradientes ambientales (Doherty, 2014). Si bien el cultivo requiere estudios adicionales para su implementación en diferentes entornos de tierras secas, ya se ha demostrado que es una estrategia eficaz para reintroducir algunas especies de CBs en hábitats degradados (Doherty, 2014).

Especies adecuadas para restauración

Independientemente de la estrategia seleccionada (cosecha o cultivo), se deben elegir las especies más adecuadas para cada proyecto de restauración. La diversidad de morfología y funciones que se encuentran en las CBs ofrece diferentes características que las hacen útiles para diversas situaciones de restauración. En sitios con condiciones de humedad muy variables puede depender de la propagación de la vegetación vascular, en lugar del crecimiento por esporas, debido a las condiciones estresantes del sitio (Ott et

al., 2019). Los sitios muy degradados, semiáridos, pueden ser adecuados para los musgos que comienzan su ciclo a partir de esporas, si hay períodos estacionales de clima fresco y húmedo en el invierno o la primavera (Belnap et al., 2016). Los sitios menos degradados pueden necesitar la incorporación de algunas especies de CBs para mejorar la biodiversidad. La identificación de las especies de CBs adecuadas para la restauración debe tener en cuenta los rasgos reproductivos que facilitan las tasas rápidas de establecimiento, que puede aumentar el éxito de la restauración (Chiquoine et al., 2016; Bowker et al., 2007).

Recomendar especies de CBs apropiadas para restaurar de manera general es difícil debido a las grandes diferencias en geografía (topografía, suelos) y clima (Mallen-Cooper et al., 2018). Los entornos varían debido a factores como la sombra, precipitación, textura del suelo, compactación (Rosentreter et al., 2020). Es importante seleccionar las especies adecuadas, con tasas de establecimiento y reproducción rápidas y abundantes, y mejorar las condiciones ambientales para el establecimiento exitoso de CBs (Condon & Pyke, 2016; Rosentreter, 2020).

Dentro de las CBs, tres son los grupos funcionales principales, con características propias, que deben elegirse previo a la selección de especies.

Cyanobacterias: la aplicación de cianobacterias como inoculantes para promover el desarrollo de la CB se ha propuesto como una técnica biotecnológica novedosa para restaurar áreas degradadas en ambientes áridos debido a que son las más fáciles de cultivar en condiciones de laboratorio, lo que las convierte en organismos clave para inducir el desarrollo

de CB en suelos degradados (Wang et al., 2009). Desempeñan múltiples funciones en el suelo: aumentan la fertilidad al fijar C y N, sintetizan exopolisacáridos, aumentan la retención de agua y mejoran la estructura y estabilidad del suelo. Las cianobacterias son los primeros colonizadores, los organismos dominantes y los principales productores primarios (Rosentreter & Belnap, 2001; Chiquoine, 2012). Para la inducción de CB, primero se selecciona una cepa nativa de cianobacterias, se produce la biomasa y luego se inocula en los suelos a restaurar (Rossi et al., 2017). Varios estudios han logrado buenos resultados con la inoculación a escala de laboratorio, aunque existen algunos problemas para su aplicación a gran escala (Park et al., 2017; Roncero-Ramos et al., 2019)

Briófitas: su crecimiento es más lento que el de cianobacterias y tienden a colonizar solo hábitats estabilizados, por lo que antes de su inoculación requieren una preparación del terreno o el establecimiento previo de otros organismos para poder asentarse (Williams et al., 2012; Chiquoine, 2012). La mayoría de los musgos se reproducen sexualmente por esporas, y debido a que solo producen estructuras sexuales en condiciones húmedas, que excepcionalmente ocurren en hábitats áridos, la mayoría de las briófitas se reproducen por medios vegetativos (Rosentreter, 2020). A pesar de las limitaciones, han sido elegidos en diversos proyectos de restauración por su relativamente rápido crecimiento por medios vegetativos, su resistencia a estrés por sequía y su participación en los ciclos hidrológicos (Doherty, 2014; Rosentreter, 2020).

Líquenes: su crecimiento es más lento que el de cianobacterias y briófitas, y

también colonizan hábitats estabilizados (Williams et al., 2012; Chiquoine, 2012). Aunque algunos se reproducen sexualmente produciendo esporas de hongos, se desconoce exactamente cómo se reproduce la mayoría de las especies, siendo la vía asexual por fragmentos de líquen o estructuras asexuales especializadas su medio más probable de colonización (Brodo et al., 2001; Rosentreter, 2020). Estos organismos son los de más lento y complicado crecimiento; sin embargo, su capacidad de incrementar y modificar rápidamente la microtopografía y la textura del suelo ha llevado a que se los considere en reiteradas oportunidades para proyectos de restauración, con éxitos en muchos casos.

Tipo de sustrato más adecuado

Una vez seleccionados los organismos de la CB, el siguiente paso es elegir el sustrato, sea para el cultivo en laboratorio o para su inoculación en campo.

Sustrato arenoso común: un sustrato arenoso esterilizado ha resultado ser el más adecuado para el desarrollo de CBs en los proyectos de restauración, realizando controles continuos de la composición de organismos (Velasco Ayuso et al., 2017). El uso de un sustrato arenoso simplifica sustancialmente el cultivo de CBs en invernadero, porque no se necesita la recolección de suelos nativos, un trabajo que requiere mayor logística y un elevado costo económico y de personal (Velasco Ayuso et al., 2017). Si bien su efectividad como sustrato de campo no ha sido bien demostrada, en cultivos de laboratorios, líquenes, musgos y cianobacterias, han demostrado altas tasas de producción (Antoninka et al., 2020; Velasco Ayuso et al., 2017).

Sustrato nativo: muchos trabajos indican que lo mejor para inocular o restaurar es el sustrato de origen de las CBs, debido a que no introduce casi cambios en la composición de la comunidad de microorganismos asociados (Chiquoine et al. 2016). La mayoría de los trabajos que han utilizado esta técnica han resultado efectivos en sus proyectos de restauración, tanto en campo como en laboratorio (Rosentreter, 2020). Sin embargo, debido a que la recolección de suelos nativos agrega un esfuerzo significativo al cultivo de CBs, en muchas ocasiones se considera el uso de un sustrato arenoso como una práctica estándar (Velasco Ayuso et al., 2017). El material de origen se puede esparcir con agua en el sitio de restauración para una dispersión más amplia. Algunos restauradores han agregado suelo mineral e incluso arena a la mezcla para lograr una dispersión más amplia y uniforme (Antoninka et al., 2020).

Suelos arcillosos-limosos: en algunos proyectos de restauración se han seleccionado suelos arcillo-limosos y, aunque de manera ocasional y contradictoria, se ha reportado que la recuperación natural de CBs ocurre más rápido con estas texturas (Chock et al., 2019). Las contradicciones pueden estar relacionadas con el tipo de especies seleccionadas y las condiciones climáticas del sitio restaurado, por lo que deben considerarse antes de seleccionar el sustrato (Dojani et al., 2011).

Factores que influyen en la restauración de CBs

Antes de avanzar con el desarrollo de las etapas del proceso de restauración propiamente dicho, es necesario analizar los tres factores considerados como los más

determinantes en la multiplicación y éxito de la restauración con CB: agua, luz y nutrientes.

Agua-humedad-riego: las condiciones de humedad y/o la frecuencia de las precipitaciones se encuentran entre los factores más importantes que contribuyen al crecimiento y la actividad de las CBs (Bu et al., 2014; Velasco Ayuso et al., 2017). La adición de agua inmediatamente después de la replantación ha mejorado el éxito de la restauración con CBs (Fick et al., 2020; Condon & Pyke, 2016). Regar las costras a una frecuencia del doble que la de los sitios de origen ha sido un factor relevante para el crecimiento. La cantidad de agua requerida para la activación probablemente varía entre sitios y las condiciones ambientales. Por lo tanto, una sola adición de agua con la inoculación puede ser insuficiente para una producción adecuada. A pesar de las limitaciones logísticas y financieras asociadas a la provisión de tratamientos de riego sucesivos, en muchas ocasiones son necesarios para facilitar el establecimiento de la CB (Chandler et al., 2019), debido a que las CBs responden rápidamente a la hidratación, pero requieren períodos de hidratación suficientemente largos para activar conjuntos específicos de genes implicados en la absorción de nutrientes, la síntesis de ATP y reparación de ADN (Bu et al., 2014). Las tasas de crecimiento de la CB se aceleran notablemente sin limitaciones de agua y nutrientes (Doherty, 2014; Velasco Ayuso et al., 2017). La sombra y el riego amortiguan las temperaturas extremas y aumentan la duración de las condiciones de la superficie húmeda necesarias para el crecimiento de las CBs, imitando las condiciones más comunes de los meses de otoño e invierno. Las CBs no están

adaptadas a la hidratación prolongada y los suelos crónicamente húmedos pueden favorecer a otros organismos como hongos oportunistas y algas verdes (Pointing & Belnap, 2012). Para suprimir estas especies no deseables, se recomiendan períodos de secado forzados. Sin embargo, breves períodos de humectación pueden favorecer la respiración sobre la fotosíntesis y pueden estresar los organismos de las CBs (Coe et al., 2012). La rápida desecación también es una fuente de estrés (Barker et al., 2005). Por lo tanto, el secado forzado debe ocurrir gradualmente y la hidratación debe durar varias horas, especialmente si las especies de origen tienen antecedentes de sitios estresantes.

Luz: la luz es un factor relevante para el crecimiento de las CBs y puede ser ventajoso para la recuperación. La escasa luz (sombra) puede ser efectiva al reducir drásticamente las temperaturas de la superficie y ampliar así los períodos de hidratación (Tucker et al., 2020; Fick et al., 2020). En algunos estudios, una baja intensidad de luz promueve el crecimiento de CBs e inmediatamente después de la replantación ha mejorado el éxito de la restauración en campo (Bu et al., 2018; Condon & Pyke, 2016). Algunos estudios en invernadero encontraron que la reducción de luz tuvo efectos positivos sobre el crecimiento de las CBs y que un 70% de sombreado en el cultivo mejoró las tasas de supervivencia (Velasco Ayuso et al., 2017, Bu et al., 2018; Chock et al., 2019). Sin embargo, el sombreado puede afectar positiva o negativamente el crecimiento de la CB dependiendo de si la temperatura y la intensidad de la luz bajo el sombreado son más bajas o más altas que la condición óptima requerida (Bu et al., 2014). La sombra puede llegar

a ser un tratamiento eficaz, pero se deben considerar tratamientos específicos en diferentes sitios, climas y tipos de suelo (Chock et al., 2019).

Nutrientes: la presencia de nutrientes en el suelo puede acelerar las tasas de crecimiento de la CB, particularmente en sustratos pobres en nutrientes (Xu et al., 2008). Para acelerar la restauración se pueden agregar diferentes enmiendas, que deben evaluarse caso por caso. En general, no se recomienda agregar soluciones nutritivas a los reservorios de agua ya que puede promover el desarrollo de algas verdes oportunistas (Doherty, 2014, 2020).

ETAPAS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN

Seleccionada la estrategia (cosecha o cultivo), definido los grupos funcionales y especies a emplear, y seleccionado el sustrato, las etapas siguientes de la restauración son: identificación de los sitios a colectar, colecta, almacenamiento, y multiplicación de la CB (Tucker et al., 2020).

Identificación de los sitios a colectar

La identificación del área donde se va a realizar la colecta implica que sean cercanas y programadas para una alteración del suelo. Donde hay CBs intactas, el riesgo de mover material no deseado es bajo. Para la identificación de los sitios es importante conocer la geomorfología (a nivel de geotopo), el tipo de suelo, la comunidad vegetal y la zona mesoclimática; además, de asegurar la presencia de especies pioneras de las CBs y de diferentes grupos funcionales (Bowker & Antoninka, 2016). Es necesario que en el

sitio se colecte y analice el suelo, se documenten las comunidades de plantas vasculares presentes y las CBs, y se realicen evaluaciones ecológicas básicas previas a la colecta. Al igual que con toda transferencia de materiales, la introducción de especies invasoras es un riesgo y requiere una consideración cuidadosa (Warren et al., 2019; Bethany et al., 2019). No se deben realizar transferencias intercontinentales (Tucker, et al., 2020), como tampoco interbiogeográficas.

Colecta

Dentro de las áreas definidas se recolecta una pequeña fracción de la CB. Para estimar los requisitos de recolección se debe considerar el tamaño del área a restaurar y la densidad de CBs en el sitio de colecta. Durante los períodos secos, cuando la CBs está deshidratada e inactiva, se identifican los grandes parches de CBs para aumentar la eficiencia; la CB se raspa de la superficie del suelo (aprox. <1 cm de profundidad) (Tucker et al., 2020). Las muestras se levantan cuidadosamente del suelo para mantener la integridad, con un tamaño entre 1 y 5 cm de diámetro (**Figura 1A-D**). Para musgos se recolectan gametofitos secos, verdes y aéreos, y esporofitos en casos de estar presentes (Doherty, 2014). Para cianobacterias, muestras de suelo con filamentos y coloración (negra-verde) detectable en superficie, pero sin visualización de musgos y líquenes (Velasco Ayuso et al., 2017). Para líquenes se colectan talos que no muestren signos de deterioro o cambio de color. En todos los casos la identidad de la especie se debe confirmar en laboratorio (Doherty, 2014). Posteriormente las CBs se desmenuzan manualmente en fragmentos, generalmente más grandes que el tamaño de los talos

de musgo individuales o las escamas de líquen. Las rocas grandes, la vegetación y la basura vegetal y otros contaminantes se evitan o eliminan antes de verter las CBs en contenedores para su transporte. Si hay especies invasoras se consideran los riesgos asociados al traslado. Todas las muestras se deben transportar a los invernaderos dentro de los dos días posteriores a la recolección, para su secado y almacenamiento (Velasco Ayuso et al., 2017) que por el costo conviene sea en lugar cercano (Tucker et al., 2020).

Almacenamiento

Las condiciones óptimas de almacenamiento son críticas para el éxito de la restauración. Las CBs recuperadas se deben almacenar secas en una sala con temperaturas entre 4 °C y 15 °C, con exposición limitada a la luz. El almacenamiento a largo plazo en condiciones adecuadas no reduce excesivamente la regeneración del organismo. En primer lugar, la mayoría de los organismos de las CBs son totipotentes, de modo que el material se puede almacenar como pequeños fragmentos (Menon & Lal, 1981). Los fragmentos más pequeños de briofitas y líquenes pueden ser más vulnerables a la desecación rápida repetida, así como a la pérdida por el viento, lo que establece un límite inferior en el tamaño óptimo de los fragmentos de CBs (Coe et al., 2012). Los organismos de la CB toleran períodos de aridez severa, calor, frío intenso y radiación ultravioleta alta, al entrar en un estado inactivo tras la desecación (Tuba et al., 1996). Varios estudios han utilizado CBs almacenadas en ensayos de restauración, y muestran evidencia de la viabilidad cuando se almacenan desecadas a temperaturas entre 4 y 15 °C, y en la oscuridad, hasta por dos años

(Antoninka et al., 2018; Chiquoine et al., 2016). Con el tiempo, a medida que se almacenan más CBs, una proporción cada vez mayor de ese material se va cubriendo de polvo y reduce su viabilidad. Para evitar fracasos futuros es necesario una clasificación y limpieza continua de las CBs, teniendo en cuenta la fecha de colecta (Clucas et al., 2008).

CULTIVO DE CBs

Si la estrategia seleccionada es la de cultivo y no la de cosecha, previo a la inoculación en campo se deberá multiplicar la muestra de CB producida en laboratorio.

La multiplicación en laboratorio consiste en inocular las CBs en recipientes de plástico transparentes (tipo macetas), llenados hasta 4 cm con el sustrato que se considere más adecuado e inoculados con las muestras de CBs colectadas en el campo (**Figura 1** E-F) (Velasco Ayuso et al., 2017; 2020; Antoninka et al., 2016). La capacidad de los recipientes usualmente empleados fluctúa entre los 100-250 ml. Para la inoculación se pueden usar diferentes técnicas: mosaico, donde se trasplantan directamente fragmentos de CBs sobre el sustrato; lechada, donde estos fragmentos de CBs se suspenden y luego se esparcen sobre el sustrato; triturados, donde cada especie o la comunidad entera de CBs se pasa por molinillos, se pesa y luego se inocula una cantidad específica en el sustrato (Bu et al., 2014; Slate et al., 2020). También puede realizarse mediante dispersión en agua y luego aplicación en el suelo (Scarlett, 1994). Para líquenes y musgos la forma más frecuente de inoculación es por fragmentación o por trituración (Antoninka et al., 2016; Fick, 2020; Doherty, 2014). En ambos casos, tanto el gametofito del musgo como el

talo del liquen deben pasarse a través de un tamiz de 2 mm para romper los agregados de suelo y homogeneizar los tejidos antes de dejarse secar e inocular. La cantidad de CBs inoculada es variable, especificándose en algunos casos tamaños de fragmentos de 1 cm de diámetro, o un peso aproximado de 20 mg cuando se trabaja con material triturado (Doherty, 2014; Slate et al., 2020). Las cianobacterias por lo general se trabajan de manera diferente, primero se suelen aislar las especies desde el sitio de estudio, manteniéndolas en medios líquidos a 25 °C y fotones de 70 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, posteriormente se multiplican (Roncero-Ramos et al., 2019). La multiplicación se suele llevar a cabo en reactores de columna de burbujas con una base hemisférica en medios exentos de nitrógeno (BG110) (Giraldo Silva et al., 2020). En algunos casos las cepas se cultivan en matraces de 1 litro con 200 ml de medio de cultivo bajo temperatura controlada a 25 °C, con un ciclo de luz solar/oscuridad de 12:12 h (Roncero-Ramos et al., 2019). En todos los casos los cultivos de cianobacterias deben ser periódicamente homogeneizados, y las cepas aisladas se mantienen en una colección de cultivos. Luego de multiplicarlas en matraces o reactores, las cianobacterias pueden ser inoculadas en macetas antes de su trasplante a campo. Esta última técnica, aunque no es frecuente, es muy recomendada, pues se ha probado que mejora el porcentaje de eficiencia en campo. Para la inoculación se utilizan con frecuencia macetas de 12 x 12 cm, a las cuales se les agrega 7 cm de suelo arenoso previamente esterilizado 3 veces en autoclave. Posteriormente se inoculan cianobacterias con una concentración inicial de 0,24-13,6 mg Clorofila a /m².

Cualquiera sea el caso (líquenes, musgos, cianobacterias) las muestras inoculadas deben ser regadas, y la frecuencia de riego debe ser coherente con la frecuencia de lluvias locales. Las malezas se deben eliminar a mano para minimizar la perturbación (Slate et al., 2020). En esta etapa, además del desmalezamiento y las variaciones en el riego, se pueden aplicar técnicas complementarias como adición de estabilizantes o incorporación de nutrientes para acelerar el crecimiento de los organismos.

Tipo de instalaciones

El cultivo de CBs puede realizarse en dos tipos de invernaderos: aquellos que son al aire libre con condiciones no controladas, o en instalaciones cerradas con condiciones controladas.

Instalaciones al aire libre: generalmente consisten en sitios ubicados cerca del área a restaurar para no modificar las condiciones de temperatura. En estas instalaciones las temperaturas fluctúan con los cambios de estación y permiten obtener especies adaptadas a las condiciones propias del sistema a restaurar (Bu et al., 2014). Sin embargo, debido a la desecación del ambiente árido, pueden no desarrollar CBs hasta luego de seis meses. Además, la contaminación alóctona por formas no terrestres es un problema que no puede evitarse si se utilizan recipientes abiertos con presencia constante de medio líquido. Por lo tanto, es necesario el monitoreo continuo de la estructura de la comunidad microbiana durante las incubaciones para asegurar desviaciones mínimas en la composición (Velasco Ayuso et al., 2017).

Invernaderos cerrados: las instalaciones de invernadero controladas permiten producir grandes cantidades de

biomasa de CBs, a partir de niveles bajos de inóculo natural, dentro de tiempos de incubación relativamente cortos (Velasco Ayuso et al., 2017). Esta instalación al no ventilarse evita que las macetas de incubación estén expuestas a la lluvia, y las temperaturas no fluctúan con los cambios de estación asegurando el éxito de mayor cantidad de especies (Bu et al., 2014). Suelen tener paneles de vidrio de borosilicato regulares para bloquear la porción de rayos UV-B de la radiación solar pero no su UV-A, proporcionando así un ambiente UV que es menos duro que a campo, pero no libre de estrés, teniendo en cuenta que los fotótrofos son especialmente sensibles a los efectos fotosensibilizados y mediados por oxígeno de los rayos UV-A (Velasco Ayuso et al., 2017). A pesar de la efectividad asegurada sigue siendo necesario el monitoreo de la estructura de la comunidad microbiana (Velasco Ayuso et al., 2017). En la actualidad la mayoría de los trabajos han optado por este tipo de instalaciones debido a que: I) es poco probable que el invernadero se puede construir cercano al sitio a inocular, II) se ha encontrado mayor éxito en la multiplicación cuando las condiciones son controladas.

Inoculación en campo

Esta etapa se desarrolla independientemente de la estrategia de obtención/producción de CB seleccionada. Las CBs provenientes de una colecta directa o de una multiplicación en laboratorio, se inoculan en el campo. La cantidad de inóculo dependerá de la cobertura final que deseamos alcanzar. Durante su inoculación se debe incorporar el sustrato seleccionado de acuerdo a nuestra experiencia (arenoso o nativo). Las estrategias de inoculación son diversas:

(a) se pueden aplicar como fragmentos y no en una suspensión para evitar romper las CBs y promover la presencia de propágulos completos (Bu et al., 2014), (b) trituradas y combinadas (musgo y líquenes), c) en suspensión líquida, d) con los panes de tierra de la etapa de multiplicación. En la mayoría de los trabajos de restauración la técnica más empleada es el trasplante de CBs en panes de tierra (musgos, líquenes, cianobacterias) (Chock et al., 2019; Fick, 2020). Esto implica el traslado al campo de CBs que han sido multiplicadas en macetas en invernaderos con su pan de tierra (aprox. 15 cm de diámetro). El trasplante se realiza de manera similar a como se realiza en plantas vasculares. Se genera un pozo de profundidad similar a la maceta, y se instala el pan de tierra de forma manual presionando levemente con las manos. La taza debe ser superficial, evitando grandes acumulaciones de agua. Al inocularlas se deben tener en cuenta los factores más influyentes en su crecimiento (luz, agua, nutrientes) para seleccionar la técnica más adecuada que permita el éxito en el proceso de restauración. Cualquiera sea la técnica empleada, inmediatamente después de la inoculación en campo, las CBs deben ser regadas, y si bien la cantidad y frecuencia de riego al inicio puede ser elevada o similar a la aplicada en laboratorio, con el tiempo debe disminuirse y asimilarse lo más posible a las condiciones climáticas del sitio restaurado.

Evaluación del desarrollo de CBs en campo o invernadero

Ya sea para evaluar su multiplicación en laboratorio o su éxito a campo, es necesario el monitoreo de la estructura de la comunidad de CB. El desarrollo de CBs

puede evaluarse a través del contenido de clorofila-*a*, ADN, las propiedades espectrales de la corteza, la abundancia y cobertura de CBs, la composición de especies y la fertilidad del suelo y su resistencia a la erosión (Schneider et al., 2012; Velasco Ayuso et al., 2017).

Técnicas de restauración

En la etapa de multiplicación en laboratorio o en la de inoculación en campo, se pueden aplicar adicionalmente diferentes técnicas de restauración tendientes a incrementar el éxito de la reproducción en laboratorio o el establecimiento en campo. Las técnicas de restauración se pueden agrupar en dos categorías: (a) estabilización artificial del suelo (aplicación de poliacrilamida —hidrogel—, aplicación de arena gruesa, uso de plantas vasculares estabilizadoras, etc); y (b) enriquecimiento (modificación de nutrientes y humedad, plantas perennes para crear sombra parcial, creación de microtopografía, etc.) (Stark et al., 2004; Bowker, 2007).

Estabilización artificial

Estabilizador psyllium: este polisacárido a base de “M-Binder” (Ecology Control, Carpinteria, CA, EE. UU.) mejora la estabilidad del suelo, evita el entierro de organismos fotosintéticos y el desplazamiento del inóculo por viento o agua. Este estabilizador tiene la capacidad de anclar los agregados de CBs en las etapas iniciales del experimento, cuando los fragmentos sueltos pueden ser arrastrados por el viento. Mantiene su efectividad después de 19 meses sin inhibir el desarrollo de CBs (Fick et al., 2020).

Enmienda de geles de poliacrilamida (PAM): se aplica para estabilizar la superficie del suelo; une las partículas de

arena y reduce el movimiento de sedimentos. Diversas experiencias indican que el empleo de PAM mejora el éxito de las inoculaciones de CBs, tanto en el laboratorio como en el campo; sin embargo, también se ha demostrado que afecta negativamente la fluorescencia de líquenes (Park et al., 2017). La textura del suelo y las condiciones climáticas pueden influir fuertemente en la cantidad requerida para que el producto sea efectivo (Green & Stott, 1999). Se requiere realizar pruebas específicas de las tasas de aplicación de PAM y su efecto en las métricas de estabilidad del suelo antes de la aplicación del tratamiento (Chandler et al., 2019). A pesar de que es recomendable comprobar su efectividad, hoy en día es el estabilizador empleado con más frecuencia en las experiencias de restauración (Green & Stott, 1999; Chandler et al., 2019).

Arcilla-limo: en algunos casos adiciones de arcilla o limo son necesarias para aumentar el contenido de partículas finas en suelos alterados. Se estima que la presencia de partículas finas en un suelo aumenta el establecimiento de cianobacterias porque minimiza el espacio que los filamentos de cianobacterias tienen para esparcirse entre partículas, aumenta la capacidad de retención de agua y crea una superficie de suelo más estable. Rozenstein et al. (2014) encontraron un crecimiento más rápido de cianobacterias en fracciones de arena fina. Zaady et al. (2017) confirmaron estos resultados cuando demostraron un mayor crecimiento de CBs cuando se combinó el inóculo con cenizas ($PM < 2,5 \mu$) de carbón. Asimismo, Felde et al. (2017) mostraron que el contenido de limo y arcilla es el principal agente cementante responsable de la estabilización de las

CBs en el desierto de Negev (Chandler et al., 2019). Los suelos arcillosos se han utilizado de manera efectiva para evitar que los fragmentos de CBs pueden laversarse o eliminarse fácilmente (Bu et al., 2018; Slate et al., 2020). Sin embargo, recubrir fragmentos de CBs con arcilla podría apelmazar las partículas de CBs y mitigar la pérdida de inoculantes de CBs debido a la erosión por viento y precipitación (Madsen et al., 2012).

Capa superficial del suelo: consiste en la aplicación de la capa superficial del suelo de origen de las muestras de CBs colectadas. Esta técnica genera un aumento en la densidad de cianobacterias y mejora el contenido de clorofila, amonio y la estabilidad del suelo (Chiquoine et al., 2016). Esta capa se obtiene de las mismas unidades de suelo del sitio cosechado y contiene especies aclimatadas a las condiciones locales de suelo y clima. La adición de la capa superior del suelo ha resultado en una respuesta positiva para la abundancia de cianobacterias, lo que indica que la recuperación y la reaplicación de la capa superficial del suelo son beneficiosas para las poblaciones de microorganismos, si la inoculación de CBs no es factible.

Enriquecimiento

Virutas de madera: los tratamientos con virutas de madera aumentan la heterogeneidad del suelo superficial, otorgan textura superficial, ralentizan el movimiento del agua superficial, aumentan la permeabilidad, la residencia del agua y funcionan como trampas de polvo (Li et al., 2012). Esto beneficia a los organismos de CBs que requieren eventos de hidratación para ser biológicamente activos (Rajeev et al., 2013; Chiquoine, 2016). En algunos casos no influyen en la

recuperación de musgos y líquenes, pero sí afectan la composición de cianobacterias al modificar la fertilidad del suelo. Se integran humedecidas en los primeros centímetros de la superficie del suelo (Chiquoine, 2016).

Plantación de arbusto perenne: los arbustos perennes aumentan la estabilidad del suelo, protegen la superficie del suelo bajo su dosel y proporcionan sombra para una hidratación prolongada del material superficial después de una precipitación (Pointing & Belnap, 2012). Además, las plantas perennes afectan la captura de polvo, y el polvo puede ser un portador de cianobacterias (Metcalf et al., 2012). Las islas fértiles también se desarrollan alrededor de las plantas perennes del desierto, creando suelos enriquecidos con nutrientes (Casermeiro et al., 2004; Chiquoine, 2016). La plantación de árboles puede no influir en la recuperación de las especies de musgos y líquenes de CBs, pero sí afectar la composición de las cianobacterias y la fertilidad del suelo,

Enmienda de NH_4NO_3 : la enmienda con NH_4NO_3 ha tenido efectos negativos sobre el crecimiento de cianobacterias, y en algunos casos se debe evitar su uso (Bu et al., 2014). Su aplicación puede inhibir el desarrollo de CBs de cianobacterias, independientemente del contenido de humedad del suelo o del nivel de sombra, aunque se sabe que las CBs poseen una alta capacidad de fijación de N_2 .

Enmienda KH_2PO_4 : niveles altos de esta enmienda no benefician el desarrollo de CBs de cianobacterias. Este resultado puede deberse a los roles secundarios de estos nutrientes en el control del desarrollo de la CBs en comparación con variables como la intensidad de la luz y la frecuencia de riego (Bu et al., 2014).

Yeso $CaSO_4 \cdot 2H_2O$: se ha observado durante mucho tiempo que los suelos con yeso sustentan comunidades bien desarrolladas de líquenes y musgos formando una superficie de suelo, en ocasiones muy estable (Zaady et al., 2017; Felde et al., 2017). No se ha observado ningún efecto sobre la estabilidad del suelo o las concentraciones de clorofila-*a* (Chandler et al., 2019). Sin embargo, los suelos yesíferos soportan una alta cobertura de líquenes y musgos, y una riqueza de especies y biomasa de cianobacterias relativamente baja en comparación con otros tipos de suelo (Steven et al. 2013). Por lo tanto, aunque este tratamiento puede ser óptimo para la recuperación de líquenes y musgos, podría no serlo para cianobacterias (Chandler et al., 2019).

Enmienda NaCl: los tratamientos con NaCl han mostrado efectos sobre las propiedades del suelo a corto plazo. Estos efectos incluyen aumento en la resistencia del suelo y una reducción en la estabilidad de los agregados del suelo, la conductividad hidráulica insaturada y la biomasa de cianobacterias (Chandler et al., 2019). Concentraciones muy altas de NaCl han tenido poco efecto sobre la supervivencia de las cianobacterias. Mientras que las plantas pueden ser sensibles a una alta salinidad, las cianobacterias pueden ser muy tolerantes a la sal (Clark et al., 2009).

Hongos micorrízicos: se han utilizado hongos micorrízicos para acelerar la recuperación de CBs. Chaudhary, et al., (2020) encontraron que la inoculación con hongos nativos o comerciales no influye en el establecimiento de CB o en la estabilidad del suelo y observaron pocos efectos sinérgicos de la inoculación simultánea de hongos y CBs. Estos resultados sugieren que, dependiendo de

la condición de las comunidades existentes, la inoculación con hongos puede no ser necesaria para promover la restauración.

Vallas de exclusión: se instalan si hay señales o presencia de ganado, caballos o burros. Consisten en mallas de alambre galvanizado de ochenta centímetros de altura que se colocan alrededor del sitio a restaurar.

Yute: se ha utilizado con éxito como sustrato para la inoculación de CB dado que aumenta la microtopografía superficial de los suelos, reduce la pérdida de fragmentos de CBs durante los eventos de viento y precipitación, estabiliza la superficie del suelo, reduce el estrés abiótico y mejora la disponibilidad de recursos (Condon & Pyke, 2016). Su efecto positivo en musgos y líquenes resultó independiente de su forma de colocación (Condon & Pyke, 2016). Para musgos y líquenes, las oportunidades de crecimiento se limitan a los breves períodos de hidratación que siguen a los eventos de precipitación (Belnap et al., 2016). Por lo tanto, los métodos que generan microclimas de mayor humedad, o prolongan la hidratación con sombra, tienden a tener una influencia positiva en el crecimiento de las CBs (Bu et al., 2018; Slate et al., 2020). Esta técnica de enriquecimiento constituye una de las empleadas con más frecuencia, debido a su bajo costo de aplicación, sencillez y elevada efectividad (Condo & Pike, 2016; Bu et al., 2018).

Carbonato de calcio CaCO_3 : el alto contenido de carbonato de calcio puede promover el crecimiento de CBs (Antoninka et al., 2018; Velasco Ayuso et al., 2017). En algunos casos el CaCO_3 no tiene efectos significativos sobre el crecimiento, esto se puede deber a que las

CBs de diferentes regiones responden de manera diferente a la enmienda de nutrientes (Bu et al., 2014; Velasco Ayuso et al., 2017).

Legislación para la colecta de CBs

Todos los proyectos de restauración que implican la colecta de individuos en la naturaleza deben incluir permisos de extracción y circulación. Si bien no siempre son exigidos por la autoridad de aplicación, tienden a preservar recursos naturales valiosos.

Cada provincia tiene su propia legislación sobre la colecta de material biológico; básicamente se solicita: especificar el objetivo de la colecta, tipo de material a colectar, zonas donde se realizará la misma, el sitio de destino final y, en el caso de guardar muestras, dónde van a ser depositadas.

En el caso de que el material vegetal deba ser trasladado, este solo puede transitar respaldado por la documentación oficial obligatoria de Senasa (Disp SENASA DNPV 4/13), acompañando el traslado de plantas o sus partes. Esta documentación, que es un instrumento de trazabilidad, respalda el origen y destino del lote transportado y debe ser exigida por quien adquiere dicho lote de plantas. Las guías (Guías de Sanidad del material) son de uso exclusivo de los operadores que mantienen la inscripción/reinscripción vigente ante el SENASA. La misma debe contener: datos de origen y destino del material, del transportista, la especie, variedad, tipo de material (planta terminada, plantín, yemas, bulbos, estacas, etc.), el número/stock. Las guías son una declaración jurada que emite el mismo interesado a través de un sistema

informático (llamado SIGDTV) al que se accede desde la página de SENASA. Se compran en el Centro Regional SENASA y son de uso exclusivo de los operadores registrados en el RENFO.

Proyectos de Restauración en la Argentina

Las CBs, a pesar de estar extensamente estudiadas en España y en Estados Unidos, en la Argentina en particular son un tema muy reciente. En los últimos años han comenzado a surgir algunos trabajos sobre su funcionalidad y se han dado los primeros pasos en su uso para restauración. Por esta razón los casos concretos de restauración de CBs en Argentina son muy escasos y aún no se han reportado resultados de éxitos o fracasos. Sin embargo, a continuación se mencionan diversos proyectos vinculados a la restauración que están en proceso reciente y cuyos resultados aún no han sido publicados.

- Costras biológicas del suelo y su potencial para ser empleadas en proyectos de restauración ecológica en el NE de Patagonia, a cargo del Dr. Zeberio Juan Manuel quien desarrolla su beca posdoctoral, Temas estratégicos en el CEANPA-UNRN-CONICET.
- Recortes de perforación base agua: evaluación para su uso en la restauración de zonas petroleras, a cargo de la Dra. Ana Laura Navas Romero, quien desarrolla su beca posdoctoral interna en el IIQ-FI-UNSJ-CONICET
- Efecto de la adición de compost y el establecimiento de las costras biológicas del suelo en la recuperación de la funcionalidad del suelo y la vegetación en ambientes degradados del ecotono estepa-bosque Andino Patagónico, a cargo de la Dra. Irene Adriana Gari-

botti. INIBIOMA- CCT CONICET - Patagonia Norte.

- Recuperación de Servicios ecosistémicos de la costra biológica del suelo en el desierto del Monte, llevado a cabo por la Lic. Vanesa Roxana García, quien desarrolla su beca doctoral en el IANIGLA-CCT CONICET- Mendoza.
- El rol de los microorganismos en la recuperación de áreas degradadas: avances de su investigación en zonas áridas de Patagonia (Argentina), desarrollado por la Dra. Adriana Rovere (INIBIOMA-CONICET).
- Mecanismos y aplicaciones de las costras biológicas del suelo en la restauración de ecosistemas áridos degradados. Programa de Cooperación Bilateral (PCB) 2019 Argentina-China. Dirigido por la Dra. Julieta N. Aranibar (IANIGLA-CONICET) y el Dr. Xinrong Li (Chinese Academy of Sciences).

CONCLUSIONES

La restauración con CB es un proceso que requiere especial atención en las zonas áridas. Su investigación continúa siendo una rama del conocimiento relativamente joven, con poca experiencia, que requiere de pruebas continuas para asegurar su éxito en el campo. El presente trabajo es un aporte que pretende indicar los principales factores y estrategias a tener en cuenta durante el proceso de restauración con CBs. Si bien se presentan las formas más adecuadas de seleccionar, coleccionar, almacenar, e inocular especies de CBs y las estrategias más apropiadas de restauración en campo (enmiendas, estabilizadores), los costos y la logística requerida en cada uno son un factor determinante en su elección. Por lo tanto, a la hora de llevar a cabo

un proyecto de restauración con CBs se debe estudiar minuciosamente cada una de las estrategias para seleccionar la más apropiada.

BIBLIOGRAFÍA

- ALPERT, P. & J.L. MARON, 2000. Carbon addition as a countermeasure against biological invasion by plants. *Biological Invasions* 2: 33-40.
- ANDERSON, D.C., K.T. HARPER & S.R. RUSHFORTH, 1982. Recovery of cryptogamic crusts from grazing on Utah winter ranges. *Journal of Range Management* 35: 355-359.
- ANTONINKA, A., M.A. BOWKER, S.C. REED & K. DOHERTY, 2016. Production of greenhouse-grown biocrust mosses and associated cyanobacteria to rehabilitate dryland soil function. *Restoration Ecology* 24(3): 324-335.
- ANTONINKA, A., A. FAIST, E. RODRIGUEZ-CABALLERO, K.E. YOUNG, V.B. CHAUDHARY, L.A. CONDON & D.A. PYKE, 2020. Biological soil crusts in ecological restoration: emerging research and perspectives. *Restoration Ecology* 28: S3-S8.
- ANTONINKA, A., M.A. BOWKER, P. CHUCKRAN, N.N. BARGER, S. REED & J. BELNAP, 2018. Maximizing establishment and survivorship of field-collected and greenhouse-cultivated biocrusts in a semi-cold desert. *Plant and Soil* 429(1-2): 213-225.
- ANTONINKA, A., M.A. BOWKER, N.N. BARGER, J. BELNAP, A. GIRALDO-SILVA, S.C. REED, F. GARCIA-PICHEL & M.C. DUNIWAY, 2020. Addressing barriers to improve biocrust colonization and establishment in dryland restoration. *Restoration Ecology* 28: 150-159.
- BELNAP, J. & D. ELDRIDGE, 2001. Disturbance and recovery of biological soil crusts. In *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 363-383.
- BELNAP, J. & S. WARREN, 1998. Measuring restoration success: a lesson from Patton's tank tracks. *Ecological Bulletin* 79: 33 pp.
- BELNAP, J., 1993. Recovery rates of cryptobiotic crusts: inoculant use and assessment methods. *Great Basin Naturalist* 53: 89-95.
- BELNAP, J., B. WEBER & B. BÜDEL, 2016. Biological soil crusts as an organizing principle in drylands. In *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Springer, Cham. pp. 3-13.
- BELNAP, J., J.H. KALTENECKER, R. ROSENTERER, J. WILLIAMS, S. LEONARD, & D. ELDRIDGE, 2001. *Biological soil crusts: ecology and management*. US Department of the Interior, Bureau of Land Management, and National Science and Technology Center: Denver, CO.
- BETHANY, J., A. GIRALDO-SILVA, C. NELSON, N.N. BARGER, & F. GARCIA-PICHEL, 2019. Optimizing the production of nursery-based biological soil crusts for restoration of arid land soils. *Applied and Environmental Microbiology* 85(15): e00735-19.
- BOWKER M.A. & A.J. ANTONINKA, 2016. Rapid ex situ culture of N-fixing soil lichens and biocrusts is enhanced by complementarity. *Plant and Soil* 408: 415-428.
- BOWKER, M.A., 2007. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, 15(1): 13-23.
- BOWKER, M.A., A.J. ANTONINKA & P.F. CHUCKRAN, 2020. Improving field success of biocrust rehabilitation materials: hardening the organisms or softening the environment? *Restoration Ecology* 28: S177-S186.
- BRODO, I.M., S.D. SHARNOFF & S. SHARNOFF, 2001. *Lichens of north America*. Yale University Press. 60, 821pp.
- BU, C., C. LI & M.A. BOWKER, 2018. Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term. *Plant and Soil* 429: 227-240.

- BU, C., S. WU, Y. YANG & M. ZHENG, 2014. Identification of factors influencing the restoration of cyanobacteria-dominated biological soil crusts. *PLoS One* 9: e90049-e90056.
- CALLISON, J., J.D. BROTHERSON & J.E. BOWNS, 1985. The effects of fire on the blackbrush (*Coleogyne ramosissima*) community in southwestern Utah. *Journal of Range Management* 38: 535-538.
- CASERMEIRO, M.A., J.A. MOLINA, M. CARAVACA, J.H. COSTA., M.I.H. MASSANET & P.S. MORENO, 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena* 57: 91-107.
- CHAMIZO, S., E. RODRIGUEZ-CABALLERO, J.R. ROMAN & Y. CANTON, 2017. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. *Catena* 148: 117-125.
- CHAMIZO, S., G. MUGNAI, F. ROSSI, G. CERTINI & R. DE PHILIPPIS, 2018. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. *Frontiers in Environmental Science* 6(49): 1-14.
- CHANDLER, D.G., N. DAY, M.D. MADSEN & J. BELNAP, 2019. Amendments fail to hasten biocrust recovery or soil stability at a disturbed dryland sandy site. *Restoration Ecology* 27(2): 289-297.
- CHAUDHARY, V.B., K. AKLAND, N.C. JOHNSON & M.A. BOWKER, 2020. Do soil inoculants accelerate dryland restoration? A simultaneous assessment of biocrusts and mycorrhizal fungi. *Restoration Ecology* 27: 1-12.
- CHEN, N., X. LIU, K. ZHENG, C. ZHANG, Y. LIU, K. LU, & C. ZHAO, 2019. Ecophysiological effects of biocrust type on restoration dynamics in drylands. *Science of the total environment* 687: 527-534.
- CHIQUOINE, L.P., 2012. Restoration of Biological Soil Crust on Disturbed Gypsiferous Soils in Lake Mead National Recreation Area, Eastern Mojave Desert. UNLV. Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones. 180 pp.
- CHIQUOINE, L.P., S.R. ABELLA & M.A. BOWKER, 2016. Rapidly restoring biological soil crusts and ecosystem functions in a severely disturbed desert ecosystem. *Ecological Applications* 26(4): 1260-1272.
- CHOCK, T., A.J. ANTONINKA, A.M. FAIST, M.A. BOWKER, J. BELNAP & N.N. BARGER, 2019. Responses of biological soil crusts to rehabilitation strategies. *Journal of arid environments* 163: 77-85.
- CLUCAS, B., K. MCHUGH & T. CARO, 2008. Flagship species on covers of US conservation and nature magazines. *Biodiversity and Conservation* 17: 1517-1528.
- COE, K.K., J. BELNAP & J.P. SPARKS, 2012. Precipitation-driven carbon balance controls survivorship of desert biocrust mosses. *Ecology* 93: 1626-36.
- DALLING, J.W., A.S. DAVIS, B.J. SCHUTTE & A.E. ARNOLD. 2011. Seed survival in soil: Interacting effects of predation, dormancy and the soil microbial community. *Journal of Ecology* 99: 89-95.
- CONDON, L.A. & D.A. PYKE, 2016. Filling the interspace - restoring arid land mosses: source populations, organic matter, and overwintering govern success. *Ecology and Evolution*, 6: 7623-7632.
- CONDON, L.A., N. PIETRASIAK, R. ROSENTERER & D.A. PYKE, 2020. Passive restoration of vegetation and biological soil crusts following 80 years of exclusion from grazing across the Great Basin. *Restoration Ecology* 28: S75-S85.
- DAVIDSON, D.W., M. BOWKER, D. GEORGE, S.L. PHILLIPS & J. BELNAP, 2002. Treatment effects on performance of N-fixing lichens in disturbed soil crusts on the Colorado Plateau. *Ecological Applications* 12: 1391-1405.
- DOHERTY, K., M.A. BOWKER, R.A. DURHAM, A. ANTONINKA, P. RAMSEY & D. MUMMEY, 2020. Adapting mechanized vascular plant seed disper-

- sal technologies to biocrust moss restoration. *Restoration Ecology* 28: S25-S31.
- DOHERTY, K.D., 2014. Moss farming: how cultivation of biocrust bryophytes may be the key to arid soil restoration. Doctoral dissertation, Northern Arizona University.
- DOJANI, S., B. BÜDEL, K. DEUTSCHEWITZ & B. WEBER, 2011. Rapid succession of biological soil crusts after experimental disturbance in the Succulent Karoo, South Africa. *Applied Soil Ecology* 48: 263-269.
- ELDRIDGE, D.J. & J.F. LEYS, 2003. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion. *Journal of Arid Environments* 53(4): 457-466.
- FELDE, V., S. PETH, D. UTEAU-PUSCHMANN, S. DRAHORAD & P. FELIX-HENNINGSSEN, 2014. Soil microstructure as an under-explored feature of biological soil crust hydrological properties: case study from the NW Negev Desert. *Biodiversity Conservation* 23:1687-1708.
- FICK, S.E., N. DAY, M.C. DUNIWAY, S. HOY-SKUBIK & N.N. BARGER, 2020. Microsite enhancements for soil stabilization and rapid biocrust colonization in degraded drylands. *Restoration Ecology* 28: S139-S149.
- GIRALDO-SILVA, A., NELSON, C., PENFOLD, C., BARGER, N.N., & GARCIA-PICHEL, F. 2020. Effect of preconditioning to the soil environment on the performance of 20 cyanobacterial strains used as inoculum for biocrust restoration. *Restoration Ecology* 28: S187-S193.
- GREEN, V.S. & D.E. STOTT, 1999. Polyacrylamide: A review of the use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment. In *The 10th International Soil Conservation Organization Meeting* (pp. 384-389). Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- HERNANDEZ, R.R. & D.R. SANDQUIST, 2011. Disturbance of biological soil crust increases emergence of exotic vascular plants in California sage scrub. *Plant Ecology* 212(10): 1709.
- HU, C.X., LIU, Y.D., SONG, L.R. & D.K. ZHANG, 2002. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands. *Journal of Applied Phycology*, 14: 281-292
- LI, X., 2012. *Eco-Hydrology of Biological Soil Crusts in Desert Regions of China* (in Chinese). Higher Education Press, Beijing.
- LÜTTGE U., E. BECK & D. BARTELS, 2011. *Plant desiccation tolerance. Ecological studies (analysis and synthesis)*. Vol 215. Springer, Berlin, Heidelberg.
- MADSEN, M.D., K.W. DAVIES, C.J. WILLIAMS & T.J. SVEJCAR, 2012. Agglomerating seeds to enhance native seedling emergence and growth. *Journal of Applied Ecology* 49: 461-438.
- MALLEN-COOPER, M., D.J. ELDRIDGE & M. DELGADO-BAQUERIZO, 2018. Livestock grazing and aridity reduce the functional diversity of biocrusts. *Plant and Soil* 429(1-2): 175-185.
- MENON, M. & M. LAL, 1981. Problems of development in mosses and moss allies. *Proceedings National Academy of Sciences USA B* 47: 115-152.
- METCALF, J.S., R. RICHARD, P.A. COX & G.A. CODD, 2012. Cyanotoxins in desert environments may present risk to human health. *Science of the Total Environment* 421: 118-123.
- NAVAS ROMERO, A.L., M.A.H. MORATTA, E. MARTINEZ CARRETERO, R.A. RODRIGUEZ & B. VENTO, 2020. Spatial distribution of biological soil crusts along an aridity gradient in the central-west of Argentina. *Journal of Arid Environments* 176: 104099.
- NAVAS ROMERO, A. L., M. A. HERRERA MORATTA, E. E. MARTINEZ CARRETERO, M. C. FERNANDEZ BELMONTE & M.A.D.C. DUPLANCIC VIDELA, 2019. Caracterización microtopográfica e influencia de las costras biológicas en la

- rugosidad del suelo en el centro-oeste de la Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. ISSN: 0373-580X.
- OTT, J.E., F.F. KILKENNY, D.D. SUMMERS & T.W. THOMPSON, 2019. Long-term vegetation recovery and invasive annual suppression in native and introduced postfire seeding treatment. *Rangeland Ecology & Management* 72: 640-653.
- PARK, C.H., X.R. LI, R.L. JIA & J.S. HUR, 2017. Combined application of cyanobacteria with soil fixing chemicals for rapid induction of biological soil crust formation. *Arid Land Research and Management* 31(1): 81-93.
- POINTING, S.B. & J. BELNAP, 2012. Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nature Reviews Microbiology* 10: 551-62.
- RAJEEV, L., D.A. NUNES, U. ROCHA, N. KLITGORD, E.G. LUNING, J. FORTNEY & S.P. AXEN, 2013. Dynamic cyanobacterial response to hydration and dehydration in a desert biological soil crust. *ISME Journal* 7: 2178-2191.
- RONCERO-RAMOS, B., J.R. ROMÁN, C. GÓMEZ-SERRANO, Y. CANTÓN & F.G. ACIÉN, 2019. Production of a biocrust-cyanobacteria strain (*Nostoc commune*) for large-scale restoration of dryland soils. *Journal of Applied Phycology* 31(4): 2217-2230.
- ROSENTERER, R., 2020. Biocrust lichen and moss species most suitable for restoration projects. *Restoration Ecology* 28: S67-S74.
- ROSSI, F., G. MUGNAI & R. DE PHILIPPIS, 2017. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant Soil* 429: 19-34.
- ROZENSTEIN, O., E. ZAADY, I. KATRA, A. KARNIELI, J. ADAMOWSKI & H. YIZHAQ, 2014. The effect of sand grain size on the development of cyanobacterial biocrusts. *Aeolian Research* 15: 217-226.
- SCARLETT, N., 1994. Soil crusts, germination and weeds issues to consider. *Victorian Naturalist* 111: 125-130.
- SCHNEIDER, C.A., W.S. RASB & K.W. ELICEIRI, 2012. NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9: 671-675.
- SEITZ, S., M. NEBEL, P. GOEBES, K. KÄPELER, K. SCHMIDT, X. SHI & T. SCHOLTEN, 2017. Bryophyte-dominated biological soil crusts mitigate soil erosion in an early successional Chinese subtropical forest. *Biogeosciences* 14(24): 5775-5788.
- SLATE, M.L., R.A. DURHAM & D.E. PEARSON, 2020. Strategies for restoring the structure and function of lichen-moss biocrust communities. *Restoration Ecology* 28: S160-S167.
- STARK, L.R., J.L. GREENWOOD, J.C. BRINDA & M.J. OLIVER, 2014. Physiological history may mask the inherent inducible desiccation tolerance strategy of the desert moss *Crossidium crassinerve*. *Plant Biology* 16: 935-946.
- STEVEN, B., L.V. GALLEGOS-GRAVES, J. BELNAP & C.R. KUSKE, 2013. Dryland soil microbial communities display spatial biogeographic patterns associated with soil depth and soil parent material. *FEMS Microbiology Ecology* 86: 101-113.
- TUCKER, C., A. ANTONINKA, N. DAY, B. POFF & S. REED, 2020. Biological soil crust salvage for dryland restoration: an opportunity for natural resource restoration. *Restoration Ecology* 28: S9-S16.
- VELASCO AYUSO S., A. GIRALDO-SILVA, C. NELSON, N.N. BARGER & F. GARCIA-PICHEL, 2017. Microbial nursery production of high-quality biological soil crust biomass for restoration of degraded dryland soils. *Applied and Environmental Microbiology* 83: e02179-16.
- VELASCO AYUSO, S. V., A. GIRALDO-SILVA, N.N. BARGER & F. GARCIA-PICHEL, 2020. Microbial inoculum production for biocrust restoration: testing the effects of a common substrate versus native soils on yield and community composition. *Restoration Ecology* 28: S194-S202.

- WARREN S.D., L.L.S. CLAIR & S.D. LEAVITT, 2019 Aerobiology and passive restoration of biological soil crusts. *Aerobiologia* 35: 45-56.
- WEBER, B., M. BOWKER, Y. ZHANG & J. BELNAP, 2016. Natural recovery of biological soil crusts after disturbance. . En: Weber, B., B Büdel & J. Belnap (Eds.). *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (Chapter 23, pp. 479-498). Springer International Publishing, AG, Cham, Switzerland.
- WILLIAMS, A.J., B.J. BUCK & M.A. BEYENE, 2012. Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal* 76(5): 1685-1695.
- XU, S., C. YIN, M. HE & Y. WANG, 2008. A technology for rapid reconstruction of moss-dominated soil crusts. *Environmental Engineering Science* 25: 1129-1137.
- YANG Y.S., C.F. BU, X.M. MU., H.A. SHAO & K.K. ZHANG, 2014. Interactive effects of moss-dominated crusts and *Artemisia ordosica* on wind erosion and soil moisture in Mu Us Sandland, China. *Science World Journal* 2014: 1-9.
- ZAADY, E., I. KATRA, D. BARKAI, Y. KNOLL & S. SARIG, 2017. The coupling effects of using coal fly-ash and bio-inoculant for rehabilitation of disturbed biocrusts in active sand dunes. *Land Degradation & Development* 28(4): 1228-1236.
- ZHAO, Y., M.A. BOWKER, Y. ZHANG & E. ZAADY, 2016. Enhanced recovery of biological soil crusts after disturbance. En: *Biological soil crusts: An organizing principle in drylands*. Springer, Cham. 499-523 pp.
- GIRALDO-SILVA, A., C. NELSON, C. PENFOLD, N.N. BARGER & F. GARCIA-PICHEL, 2020. Effect of preconditioning to the soil environment on the performance of 20 cyanobacterial strains used as inoculum for biocrust restoration. *Restoration Ecology* 28: S187-S193.

Recibido: 09/2020
Aceptado: 12/2020