



Restauración de la Caatinga: métodos propuestos para recuperar el más exclusivo y menos conocido ecosistema de Brasil

Restoration in Caatinga: a proposal for revegetation methods for the most exclusive and least known ecosystem in Brazil

FÁBIO SOCOLOWSKI¹, DANIELA C. M. VIEIRA¹, BRUNO R. SOUZA²,
FELIPE P. L. MELO^{2*} Y RENATO G. RODRIGUES^{1,3}

¹ Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina-PE, Brasil

² Centro de Biociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, Brasil

³ Colegiado de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina-PE, Brasil

*<felipe.plmelo@ufpe.br>

RESUMEN

En este trabajo presentamos las principales técnicas de restauración desarrolladas para atender a la demanda de restauración de las zonas secas de Brasil impactadas por grandes obras de infraestructura. Desarrollamos un conjunto de técnicas de nucleación de bajo costo y fácil implementación para recuperar áreas con alto grado de degradación, considerando tanto elementos de las áreas sin vegetación como las condiciones del paisaje alrededor. Proponemos un total de cinco tipos de intervención, que van desde una sencilla siembra directa monoespecífica hasta el aprovechamiento de restos de ramas y cactus para formar un cinturón protector de núcleos de plántulas plantadas. Hasta la fecha, esas son las técnicas que más se han adaptado a las condiciones de campo, sin auxilio de riego y con bajo costo de mantenimiento. Creemos que el monitoreo a largo plazo de estas técnicas proveerá evidencias más robustas de su eficacia, pero los resultados preliminares son positivos. La restauración de la Caatinga es un reto enorme para la ciencia de la restauración en Brasil, así como una oportunidad de desarrollo para métodos y técnicas novedosas en restauración ecológica.

ABSTRACT

In this paper we present the main ecological restoration techniques developed to meet a need to restore dry areas in Brazil impacted by great infrastructure works. A set of inexpensive and easy to execute nucleation techniques was developed to recover very degraded areas, considering both the elements of deforested areas and the surrounding landscape conditions. Five types of intervention have been proposed, ranging from simple monospecific direct seeding to the use of remnants of branches and cacti to form a protective fence for planted seedling nuclei. Until now, these are the



techniques more adapted to field conditions, without irrigation aid and with low maintenance costs. We believe that long term monitoring of these techniques will provide more robust evidence of their effectiveness, but the preliminary results are positive. The restoration of Caatinga is a huge challenge for the science of restoration in Brazil, as well as an opportunity to develop new methods and techniques for ecological restoration.

Palabras clave: degradación ambiental, especies nativas, nucleación, región semiárida, siembra directa

Keywords: *environmental degradation, native species, nucleation, semiarid region, direct seeding*

INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales estacionalmente secos (BTES) son ecosistemas terrestres marcados por una periódica y prolongada sequía (Silva et al., 2017). Esa condición climática hizo que la fauna y flora evolucionaran a través del desarrollo de muchas adaptaciones a la escasez hídrica. En el caso de la flora, las plantas de ambientes hídricamente estresados suelen presentar dehiscencia (pérdida de hojas) y otras características fisiológicas que les permiten lidiar con la falta de agua por largos periodos, como modificación de hojas en espinas, semillas durmientes, y tejido con capacidad de almacenaje de agua (Gei et al., 2018). Esa diversidad de estrategias y sus especificidades representan un reto importante para la restauración ecológica de estos ecosistemas (Wells & Winowiecki, 2017). Hay muy pocas experiencias de restauración a gran escala para BESS que ofrezcan modelos replicables de restauración (Wells & Winowiecki, 2017). Las condiciones de estrés hídrico pueden matar muchas plantas volviendo el proceso de plantación extremadamente costoso. Por lo tanto, manejar la regeneración natural a través de intervenciones eficientes y baratas puede ser la mejor opción para crear modelos de restauración en BTES

(Latawiec et al., 2016). La recuperación activa y la regeneración natural son a menudo estrategias complementarias en un gradiente de intensidad de acciones (Reid et al., 2018).

En Latinoamérica hay BTES en países como México, Colombia, Bolivia, Ecuador, Paraguay y Brasil. Esos bosques casi siempre son ocupados por poblaciones tradicionales que dependen en distintos grados de los servicios ecosistémicos que proveen esos bosques (Melo, 2017). Por lo tanto, cualquier intervención de restauración debe considerar los tipos de uso y perturbación asociados (Brancaion et al., 2012). Muchos BTES son usados como áreas de pastaje natural para la cría de animales como bovinos, caprinos y ovinos (Johnson et al., 1986). La restauración en esas áreas puede verse afectada por el pastoreo de esos animales, que son capaces de consumir plántulas y retardar la regeneración (Menezes et al., en prensa). Además, el trasplante de plántulas de viveros forestales hacia zonas de restauración suele tener bajo éxito debido a la alta mortalidad de plántulas en condiciones de sequía sin un período de adaptación que aumente su supervivencia. Así, la conducción de la regeneración natural de manera asistida emerge como la opción más eficiente y menos costosa para lidiar con los típicos

usos de suelo y perturbaciones presentes en selvas secas de Latinoamérica (Capers et al., 2005).

En Brasil, la selva seca que domina la porción noreste es conocida como Caatinga (del tupi: *k'aa* = bosque y *tinga* = blanco). Esa es una región que es hogar de más de 25 millones de personas, en general muy pobres y altamente dependientes de los servicios del bosque seco para su supervivencia (Albuquerque et al., 2017). Con algunas excepciones de zonas de agricultura irrigada intensiva a lo largo del gran río de la región, el río San Francisco, el modelo de agricultura practicado en esta zona es de pequeñas plantaciones rotativas y cría de caprinos (Melo, 2017). Adicionalmente, la leña es la principal fuente energética de la población humana que la extrae de los remanentes naturales de bosque a su alrededor (Specht et al., 2019). Así, el cómputo de cobertura forestal de este ecosistema aún es favorable en su total, con un 60% de su área aún conservada en cuanto a bosque, con baja perturbación humana crónica (leña, caprinos y pequeñas plantaciones) (Antongiovanni et al., en prensa). Sin embargo, muchas áreas a las orillas de ríos y riachuelos, nacientes de agua y áreas en declive fueron degradadas y necesitan restauración. En esas áreas de degradación más intensa las presiones humanas pueden llevar a la desertificación (Manzano & Návar, 2000). Por ello, es fundamental desarrollar técnicas de restauración adaptadas a las condiciones de estrés hídrico de la Caatinga.

En las últimas décadas, una gran cantidad de grandes obras de infraestructura tomaron lugar en la Caatinga (Neri et al., 2019). La mayor de todas es el proyecto de trasvase de las aguas del río São

Francisco. Por las leyes ambientales brasileñas, obras de esa magnitud necesitan forzosamente de planes de recuperación para mitigar la degradación ambiental causada por el movimiento de suelo y máquinas de las zonas afectadas. Las compensaciones por los daños ambientales de esta obra han generado una gran cantidad de inversiones en el desarrollo local, incluyendo la creación de centros de investigación en biodiversidad y restauración de la Caatinga, consecuentemente aumentando la disponibilidad de datos (De Oliveira et al., 2020). Eso ha posibilitado estudios de largo plazo y la creación de métodos de restauración que se adapten a las condiciones locales del ecosistema de la Caatinga. Particularmente, ese ha sido un reto aparte, ya que de la inmensa mayoría de la literatura acerca de los métodos y técnicas de restauración existentes, apenas una muy pequeña proporción trata específicamente de bosques secos y mucho menos aún de la Caatinga (Melo et al., 2012). Por ello, la experiencia práctica acumulada en la literatura con respecto a la restauración de este ecosistema es prácticamente nula.

Para llenar este vacío de información, presentamos aquí un resumen de las técnicas para recuperar la vegetación con mayor potencial de éxito que se han desarrollado en el Núcleo de Ecología e Monitoramento Ambiental - NEMA de la Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF. Esta institución es la responsable de elaborar, poner en práctica y monitorear los planes de restauración que van a recuperar el pasivo ambiental dejado por las obras de trasvase de las aguas del río São Francisco. Aquí presentamos un conjunto de métodos desarrollados para: 1) reducir costos de recuperación de vegetación, 2) mejo-

rar la supervivencia de plántulas y 3) resistir a las presiones locales existentes (factores abióticos y socioambientales). El éxito de la aplicación de cada una de las técnicas y métodos a gran escala aún están bajo monitoreo. Lo que presentamos aquí son un conjunto de acciones de restauración que han sido presentadas oficialmente a las instituciones responsables por la recuperación del pasivo ambiental, con pruebas preliminares a campo y con resultados alentadores hasta la fecha.

LAS OBRAS DE TRASVASE DEL RÍO SÃO FRANCISCO

Lo presentado en este artículo son productos y procesos desarrollados en respuesta a la compensación ambiental legalmente requerida para las obras de trasvase de las aguas del río São Francisco (Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF), un importante río que cruza la zona más seca de Brasil. Esta es la mayor obra de infraestructura hídrica de Brasil, totalmente financiada con recursos públicos, que básicamente consiste en trasponer aguas por canales entre cuencas hídricas de la región semiárida brasileña para atender a la demanda hídrica de casi 20 millones de personas que viven en los estados más al norte de la región seca del Noreste de Brasil (**Figura 1**). Los canales, nombrados “Eixo Norte” y “Eixo Leste”, cruzan vastas regiones planas, pasando por diversas formaciones vegetales insertas en un gradiente de aridez que puede variar enormemente. También es posible encontrar una gran variedad de uso de los recursos naturales por la población humana, y diferentes grados de fragmentación y cobertura forestal. Para la

construcción de los canales fue necesario superar elevaciones de más de 300 m, por lo que fue crucial la construcción de 27 reservorios, cuatro túneles y nueve estaciones de bombeo (Rodrigues, 2012). La grandiosidad de la obra y su impacto se puede resumir por las 28 mil hectáreas de deforestación legalmente autorizadas para la instalación de la obra que consiste en dos canales, de más de 220 km de extensión cada uno, en donde hubo supresión de vegetación en una franja de 200 m que deberán ser recuperados (**Figura 1**). La recuperación ambiental, que implica la investigación de los métodos reportados en este documento y la ejecución de la recuperación a campo, está siendo financiada por los mismos recursos públicos que financiaron la obra.

Métodos de recuperación aplicados

La nucleación es un método ya conocido y bien estudiado en la restauración ecológica de paisajes degradados (Reis et al., 2010). Como técnicas de nucleación, tenemos la transposición de suelo, transposición de ramas, perchas artificiales, siembra directa y plantación en núcleo (Reis et al., 2003). Tiene el potencial de ser una estrategia de restauración de menor costo que la plantación total del área (Benini et al., 2017; Corbin & Holl, 2012). Su principio es que la regeneración natural puede ser acelerada y conducida a través de islas de regeneración esparcidas por el paisaje degradado y que servirán inicialmente como atractores de fauna dispersora y retenedores de propágulos (Corbin & Holl, 2012). Posteriormente, esos núcleos servirán como fuente de propágulos para todo el paisaje degradado. Para el caso de la Catinga, la nucleación exige la plantación con diferentes estrategias de crecimiento

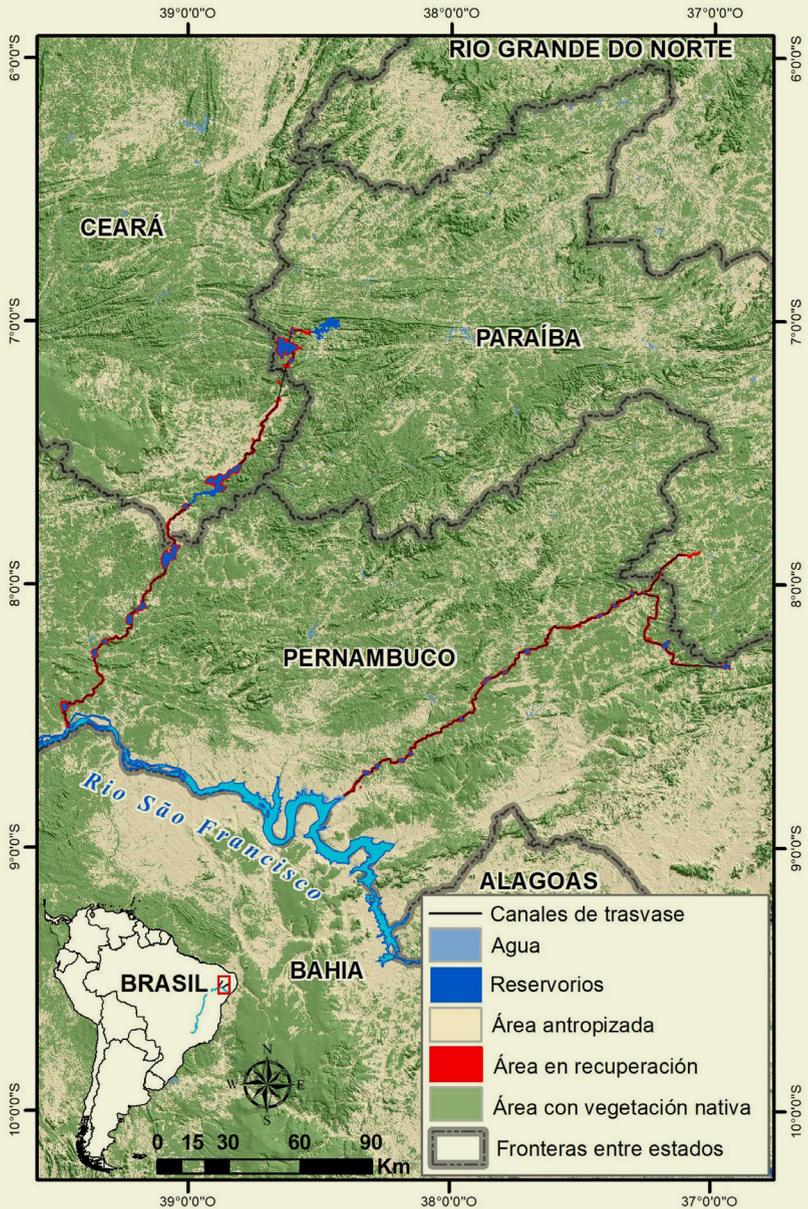


Figura 1. Esquema de la obra de transposición del río São Francisco en sus dos canales de más de 220 km cada uno. “Eixo Leste” canal derecho y “Eixo Norte” canal izquierdo

Figure 1. Plan of the São Francisco River transposition work in the channels of more than 220 km each one. “Eixo Leste” right channel and “Eixo Norte” left channel

y atractividad de la fauna dispersora, sin embargo, deben ser resistentes a la fauna herbívora, especialmente exótica, como chivos que forrajean libremente por la Caatinga. Eso crea un doble reto: el de seleccionar especies resistentes a la severidad de la sequía de este ecosistema y al mismo tiempo resistentes a la presión de herbívoros.

Siembra de baja densidad (SBD)

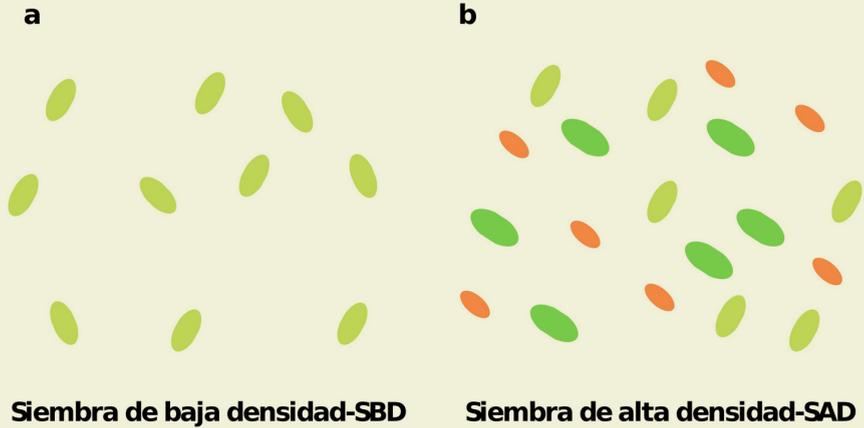
La siembra de baja densidad (SBD) es el método de restauración activa más barato y sencillo, indicado para áreas sin cobertura vegetación/suelo expuesto que acaba de ser degradado por remoción total de vegetación (mayor resiliencia). El objetivo de la SBD es recuperar una cobertura vegetal mínima, inicialmente de especies herbáceas-arbustivas de crecimiento acelerado. Este método no está destinado a recuperar la diversidad vegetal del suelo sino apenas un recubrimiento inicial que posibilite el reclutamiento posterior del banco de semillas, a mediano y largo plazo. Por lo general se elige este método en localidades con alrededores bien forestados y en donde se espera que la vegetación remanente funcione como fuente de propágulos. Para ello, se eligió una especie de Fabaceae, nativa, muy común localmente que suele colonizar áreas degradadas de Caatinga, *Senna uniflora* (Mill.) H.S.Irwin & Barneby (Lorenzi, 2008; Alves et al., 2009), con el potencial de recuperar esas áreas. Esa especie es conocida localmente como “mata-pasto” por su gran capacidad de colonizar áreas abiertas como pasturas abandonadas, llegando a competir con especies de gramíneas que forman pastos. Por tratarse de una leguminosa, esta especie ayuda a recuperar la fertilidad del suelo por su capacidad de fijar ni-

trógeno, que proporciona condiciones más favorables para el establecimiento de otras especies (Pereira et al., 2013). La siembra es realizada manualmente lanzando una densidad de alrededor de 36 semillas/m² (i.e. 360.000 semillas/ha). Antes de la siembra, las semillas son mezcladas con materiales vegetales, como el bagazo de caña de azúcar, con el fin de aumentar el volumen del material sembrado y así tener éxito en distribuirlos en el área a recuperar. En campo, se hace un subsolado para evitar la desecación de las semillas y ayudar a su incorporación en el suelo. Las ventajas de este proceso son principalmente su bajo costo y la posibilidad de cubrir extensas áreas que se encuentran con suelo expuesto, donde la regeneración natural, después de sembrar, es no solo posible sino probable por las condiciones del entorno.

Siembra de alta densidad (SAD)

Cuando las condiciones son más desfavorables, áreas sin regeneración natural y con menos resiliencia para la germinación y el reclutamiento, sugerimos la siembra de alta densidad (SAD). Este método consiste en los mismos procedimientos que su casi análogo de baja densidad (SBD) con la diferencia de que se incrementa la riqueza y densidad de semillas que se aplican al suelo (**Figura 2b**). El objetivo ahora es adicionar, además de una leguminosa con alta producción de semillas (*S. uniflora*), otras especies con diferentes atributos ecológicos y funcionales.

Para ello, fueron seleccionadas cuatro especies de plantas nativas de Brasil: *Rhaphidodon echinus* (Nees & Mart.) Schauer (Lamiaceae), *Sida galheirensis* Ulbr. (Malvaceae), *Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze (Lamiaceae) y/o *Herissantia*



Referencias

-  **Hierba de crecimiento acelerado**
-  **Hierba baja para producción de hojarasca**
-  **Leguminosa con alta producción de semillas**

Figura 2. Esquema representativo de los métodos de siembra directa de baja densidad (a) y alta densidad (b)

Figure 2. Representative scheme of low density (a) and high density (b) direct seeding methods

crispa (L.) Brizicky (Malvaceae). *Rhaphiodon echinus* es una hierba perenne, con un tallo postrado y muy ramificado (Albuquerque & Almeida, 2002). Es tolerante a la sequía y a menudo se encuentra en pastos y bordes de caminos cubriendo completamente el suelo (Lorenzi, 2008). *Sida galheirensis* es un subarbusto, se encuentra en la región noreste de Brasil (Bovini, 2020). Es una planta perenne, que ocupa áreas de cultivos y pastos (Moreira & Bragança, 2011). *Mesosphaerum suaveolens* es un subarbusto anual, a menudo se encuentra en cultivos abandonados y bordes de caminos. *Herissantia crispa* es una herbácea/subarbusto perenne, tolerante a larga sequía y suelos pobres.

Es una planta típica de Caatinga, ocurre abundantemente en pastos, bordes de caminos y terrenos baldíos (Lorenzi, 2008).

Para su aplicación, por lo general se seleccionan tres especies, siendo una de ellas *S. uniflora*, y otras dos que están disponibles en cantidad suficiente, cuyo uso se relaciona con la producción natural de las plantas y el esfuerzo de recolección, además de la demanda (tamaño del área a recuperar). La densidad de *S. uniflora* se mantiene igual a 36 semillas/m², pero las dos especies adicionales se siembran a densidades iguales de 65 semillas/m² (650.000 semillas/m²). Tal como se hace en SDB, antes de sembrar, las semillas son mezcladas con materiales vegetales

(bagazo de caña de azúcar). La siembra se puede hacer manualmente y su incorporación al suelo se puede hacer mecánicamente con herramientas sencillas (azada, rastrillo) o con máquinas (tractor).

Núcleo de aceleración de regeneración natural con pioneras (NARN-P)

Es un núcleo de especies mayormente pioneras. La disposición de las plántulas debe ocupar un área total de 64 m² (8 m x 8 m). La parte exterior del núcleo está formada por especies pioneras con características más rústicas (p.ej. *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill.) y un cactus (p.ej. *Xiquexique gounellei* (F.A.C.Weber) Lavor & Calvente) y la parte central, por especies pioneras (p.ej. *Aspidosperma pyrifolium* Mart. & Zucc., *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis, *Cnidocolus quercifolius*, *Croton blanchetianus* Baill., *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.). Estas especies son nativas y pueden producirse en viveros y encontrarse comercialmente. En el caso de PISF, también existe un intercambio entre el proyecto y los viveros de la región, intercambiamos semillas recolectadas por plántulas.

La recomendación de este método es para situaciones donde se desea una recuperación más acelerada de zonas altamente impactadas, pero con cierta capacidad de regeneración natural debido al entorno aún forestado. El esfuerzo mínimo recomendado es de 6 NARN-P por hectárea (78 plántulas), lo que reduce drásticamente el número de plántulas para la recuperación del área (**Figura 3**).

Núcleo de aceleración de regeneración natural con secundarias (NARN-S)

Este método usa especies no pioneras, o sea, aquellas que suelen ocurrir en estadios intermedios y avanzados de la

regeneración de la Caatinga. Por ello, su recomendación es para situaciones con baja degradación pero que necesitan de conexión funcional, como corredores de fauna y áreas riparias. Este tipo de nucleación no tiene intención de iniciar la regeneración sino de hacerla más rica en especies y funciones ecológicas, creando microclimas adecuados para la microfauna del suelo (detritívoros, principalmente). Las especies son de crecimiento más lento y sus plántulas tienen un costo elevado de producción, debido al mayor tiempo en el vivero. Por ello, la protección de estas plántulas con estructuras físicas que mantengan herbívoros exóticos como bóvidos y caprinos es fundamental. La densidad mínima recomendada es igualmente de seis NARN-S por hectárea de intervención. La lógica de la instalación de un NARN-S es igualmente sencilla. Se utilizan especies de crecimiento más lento, secundarias tardías (p.ej. *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm., *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl., *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillett, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Pseudobombax marginatum* (A.St.-Hil., Juss. & Cambess.) A. Robyns, *Sapindus saponaria* L., *Sarcomphalus joazeiro* (Mart.) Havenschild, *Schinopsis brasiliensis* Engl.) y un cactus (p.ej. *Cereus jamacaru* DC.) en el centro, que se alternan gradualmente hasta que se forma un cinturón de secundarias iniciales (p.ej. *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz, *Mannihot carthagenensis* (Jacq.) Müll.Arg. y *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore) y un cactus (p.ej. *X. gounellei*) (**Figura 4**). Todo el núcleo es finalmente protegido usándose ramas espinosas amontonados de una especie



Figura 3. Esquema conceptual del núcleo de aceleración de regeneración natural con pioneras (NARN-P)

Figure 3. Design of the natural regeneration acceleration nuclei with pioneer species (NARN-P)

exótica muy común en la región y que es explotada por poblaciones locales como fuente de madera y forraje para animales, *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. Esta especie también ha invadido otras zonas semiáridas de América del Sur. Nuestra experiencia es que esta cerca, mantenida a aproximadamente 1 metro de altura, dificulta el acceso de los herbívoros y suaviza el microclima dentro de los núcleos (Figura 4).

Núcleos de alta diversidad (NAD)

Este método está indicado para la aceleración de regeneración de grandes áreas, de alta importancia ambiental, pero con elevado grado de degradación. El principio de esta técnica es aprovechar pequeñas depresiones naturales del terreno y orillas de lagos y ríos intermitentes, muy comunes en la Caatinga. Esas depresiones y pequeños

cursos de agua pueden aumentar la sobrevivencia de plántulas en regiones semiáridas, atraer fauna y funcionar como un núcleo de diversidad para áreas en avanzado estado de degradación. El drenaje natural y las áreas húmedas son reservorios de especies más raras en ambientes semiáridos como la Caatinga. Por lo tanto, un conjunto de alta diversidad de especies no tan comunes en las zonas secas puede ser usado en estos núcleos de regeneración. Nuestras experiencias en la Caatinga han funcionado con un total de 10 especies arbóreas nativas sembradas en distancias de 2 m entre plántulas en círculos concéntricos cercados con una cerca viva de cactus de la especie *X. gounellei* para impedir las embestidas de grandes herbívoros domesticados como bueyes y cabras (Figura 5). La cantidad de círculos concéntricos

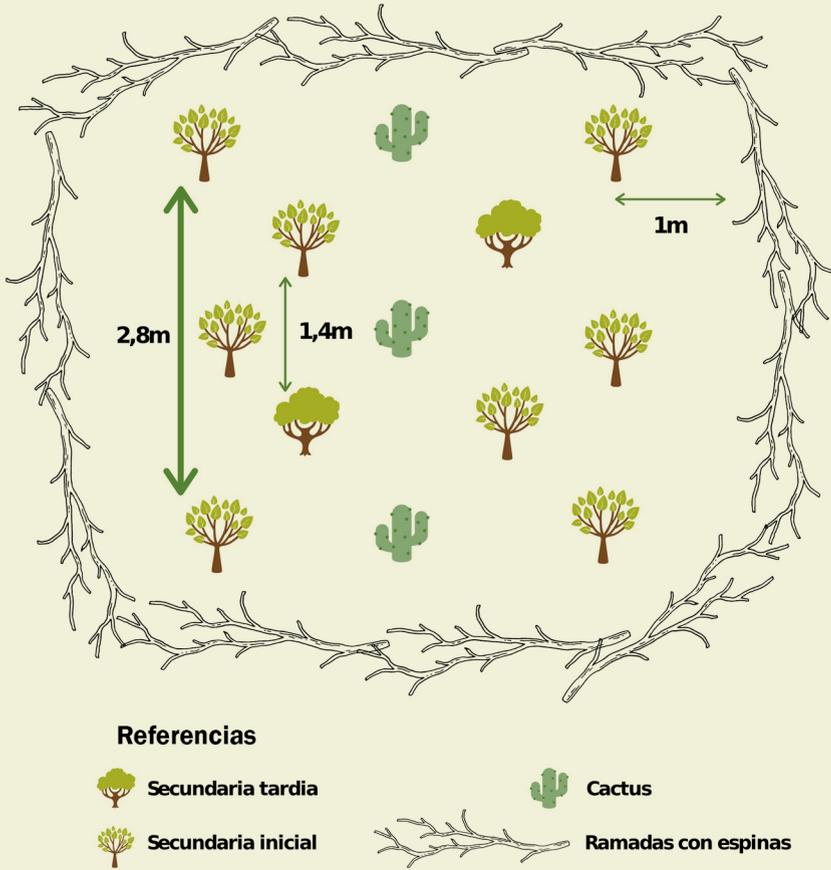


Figura 4. Esquema conceptual de un núcleo de aceleración de regeneración natural con especies secundarias (NARN-S). Esos son núcleos pequeños con un máximo de 5 m de diámetro, generalmente distribuidos a lo largo de áreas en regeneración natural intermedia. *Figure 4. Design of the natural regeneration acceleration nuclei with secondary species (NARN-S). These are small nuclei with a maximum diameter of 5 meters, usually distributed over areas in intermediate natural regeneration*

puede variar dependiendo del tamaño del área húmeda, su duración anual y la cantidad de especies disponibles. Se recomienda que las especies más hidrofílicas sean sembradas más cerca del agua o zona húmeda y que a medida que se distancian los círculos se utilicen especies más xerofíticas.

Monitoreo de los métodos de siembra directa y nucleación

Hasta la fecha el monitoreo de los métodos de restauración está en fase muy inicial como para tener resultados contundentes sobre su eficiencia y limitaciones. Sin embargo, compartimos aquí el método que se ha diseñado. Primeramente, se

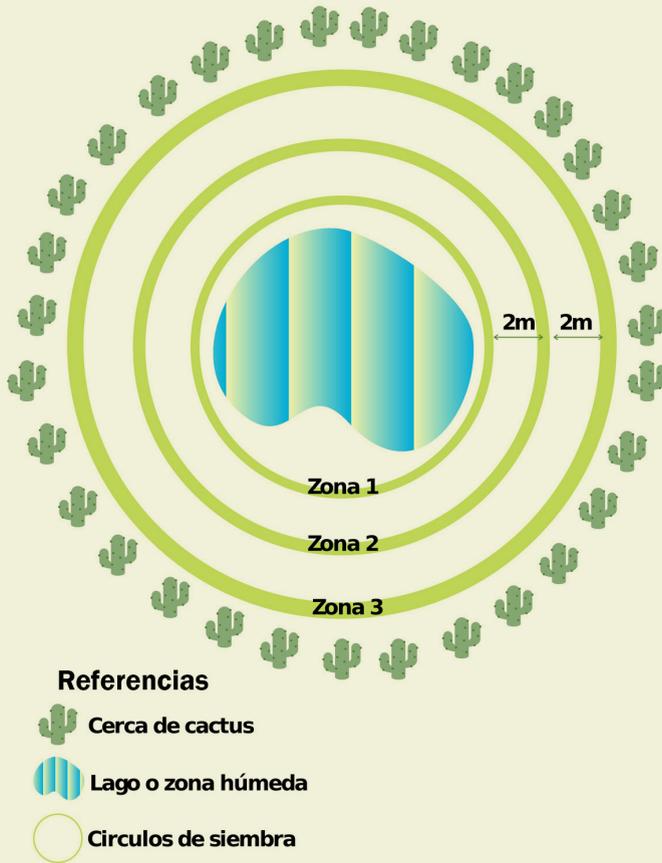


Figura 5. Dibujo representativo del núcleo de alta diversidad (NAD) que se establece alrededor de zonas húmedas, valles y depresiones que acumulan humedad por períodos prolongados de tiempo

Figure 5. Representative design of the high diversity nuclei (NAD) that is established around humid zones, valleys, and depressions that accumulate humidity for a long time

planeó el monitoreo de todos los métodos por un periodo de tres años en intervalos de cuatro meses (tres veces al año). Este método busca cuantificar la presencia tanto de especies que fueron añadidas, vía siembra directa o de plántulas, como especies de la regeneración natural que reclutaron espontáneamente, dentro

y fuera de los núcleos. Como la cobertura inicial del suelo es un problema para superar para la recuperación de paisajes semiáridos, una atención especial se está dando a la cobertura del suelo, clasificada en categorías con intervalos: 0-1%; 1-10%; 10-25%; 25-50%; >50%. La mortalidad de las plántulas está siendo igual-

mente monitoreada y la eventual sustitución de estas es recomendada en los tres primeros años. El monitoreo se realiza tanto en áreas con intervenciones (recuperación activa) como en áreas degradadas sin intervención y en áreas preservadas de Caatinga, a las que llamamos de referencia negativa y referencia positiva, respectivamente. Al final de este artículo se encuentran fotos de algunos métodos descritos en el trabajo y ya aplicados en el campo.

En el primer trimestre de 2019, intervinimos en 203,99 ha en un tramo del “Eixo Leste” del PISF, en los municipios Floresta (PE) y Custória (PE). En el 8,7% del área en recuperación se aplicó el método SBD y en 91,3%, el SAD. Implementamos 743 NARN-P, 253 NARN-S y un NAD.

Después de la intervención con SBD, el 46,1% del área en recuperación tuvo una cobertura de suelo menos de 25%. Después de un año, el 25,6% del área tenía una cobertura vegetal del suelo entre el 25-50% y el 69% del área estaba cubierta por encima del 50%, un aumento de aproximadamente 4x. En el área de SAD, después de la intervención, el 66% tuvo cobertura vegetal del suelo menos de 25%. Después de un año, el 40,4% tuvo cobertura vegetal del suelo entre el 25-50% y el 37% tuvo una cobertura superior al 50%. En nuestro monitoreo, hemos observado fluctuaciones en la cobertura del suelo debido a la estacionalidad de las lluvias, que es característica de la Caatinga. Después de 1 año y 4 meses, las especies *C. quercifolius* y *J. mollissima* se destacaron en NARN-P con más del 80% de supervivencia, y *A. pyriformium*, *X. gounellei* y *C. pyramidale* con supervivencia intermedia, alrededor del 50% (Tabla 1). En NARN-S, las especies

C. eptophloeos, *L. ferrea*, *X. gounellei*, *C. jamacaru* y *P. marginatum* se destacaron con supervivencia entre 80-60% (Tabla 2). En NAD, después de 1 año, la menor supervivencia fue la de *P. marginatum* (61.9%), mientras que las otras especies mostraron una supervivencia de entre 84.9 y 100% (Tabla 3).

PRINCIPALES LECCIONES

La recuperación de bosques tropicales secos no está entre las prioridades de investigación en restauración ecológica, lo que resulta en severa escasez de información (Melo et al., 2012). Dicha escasez ha hecho que grupos de investigación en restauración ecológica de la Caatinga hayan iniciado estudios muy amplios que cubren desde la producción de plántulas hasta el inventario florístico de la Caatinga. Por lo tanto, todo lo presentado aquí está en fase de monitoreo y las conclusiones son aún preliminares. Sin embargo, esta es la recopilación de las mejores técnicas que hemos probado desde el principio de las investigaciones y creemos, con base en evidencias aún no publicadas, que son las mejores técnicas entre las probadas. Algunos avances han sido alcanzados para crear y ajustar métodos de restauración para la Caatinga, como el aumento de la supervivencia de plántulas con partes subterráneas más desarrolladas y la adición de fertilizantes y agua a las siembras de estas (Teixeira et al., 2020). Sin embargo, la recuperación de extensas áreas que han sido impactadas por grandes obras de infraestructura necesita de métodos que conjuguen tanto la siembra (semillas y plántulas) como la regeneración natural (Calmon et al., 2011). Los métodos aquí presentados fueron desarrollados para atender a las

Tabla 1. Supervivencia (%) de las especies NARN-P después de 1 año y 4 meses de plantar

Table 1. Survival (%) of NARN-P species after 1 year and 4 months of planting

Especies	Supervivencia (%)
<i>Aspidosperma pyriformium</i>	58.5
<i>Cnidocolus quercifolius</i>	91.2
<i>Croton blanchetianus</i>	44.5
<i>Jatropha mollissima</i>	83.1
<i>Mimosa tenuiflora</i>	36.9
<i>Xiquexique gounellei</i>	56.7
<i>Cenostigma pyramidale</i>	51.9

Tabla 2. Supervivencia (%) de las especies NARN-S después de 1 año y 4 meses de plantar

Table 2. Survival (%) of NARN-S species after 1 year and 4 months of planting

Especies	Supervivencia (%)
<i>Amburana cearensis</i>	13.2
<i>Anadenanthera colubrina</i>	47.2
<i>Astronium urundeuva</i>	42.6
<i>Cereus jamacaru</i>	64.8
<i>Commiphora leptophloeos</i>	79.6
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	0.0
<i>Libidibia ferrea</i>	70.4
<i>Manihot carthagenensis</i>	53.8
<i>Pseudobombax marginatum</i>	63.1
<i>Sapindus saponaria</i>	18.2
<i>Sarcomphalus joazeiro</i>	54.0
<i>Tabebuia aurea</i>	24.0
<i>Xiquexique gounellei</i>	66.4

demandas del PISF y el cumplimiento del pasivo ambiental que la obra ha dejado. A la vez, esta oportunidad ha sido usada para el desarrollo de un centro de investigación y desarrollo tecnológico ambiental para la Caatinga.

Hasta la fecha, el reto de generar protocolos de restauración de bosques secos, que serán implementados a gran escala como resultado de la remediación de una obra pública, ha dejado algunos beneficios y otras dudas. Entre los beneficios están la formación de decenas de estudiantes de nivel técnico, pregrado y posgrado en temas relacionados a la restauración de la Caatinga. Esa cantidad de estudiantes formados fue posible por la cooperación en red con otras universidades e instituciones de investigación. El conocimiento generado ha sido debatido públicamente y considerado en ni-

Tabla 3. Supervivencia (%) de las especies NAD después de 1 año de plantar

Table 3. Survival (%) of NAD species after 1 year of planting

Especies	Supervivencia (%)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	93.0
<i>Aspidosperma pyriformium</i>	91.7
<i>Cenostigma pyramidale</i>	100.0
<i>Croton blanchetianus</i>	100.0
<i>Jatropha mollissima</i>	88.1
<i>Libidibia ferrea</i>	100.0
<i>Manihot carthagenensis</i>	84.9
<i>Mimosa tenuiflora</i>	100.0
<i>Pseudobombax marginatum</i>	61.9
<i>Sarcomphalus joazeiro</i>	90.0

veles decisorios gubernamentales como los comités de gestión de las cuencas de los ríos de la Caatinga, que son entidades públicas en Brasil con mucho poder decisivo e influencia política en la toma de decisiones. Considerando el elevado grado de degradación de las áreas en donde hemos probado esas técnicas, creemos que su adopción en otras áreas con condiciones semiáridas y degradadas puede ayudar a contener procesos de desertificación, un grave fenómeno que ha assolado la región seca de Brasil y otras regiones del mundo.

Los retos para la restauración de la Caatinga son mucho más grandes que meramente el desarrollo técnico. Estamos hablando de una de las zonas rurales más pobres y densamente pobladas de Brasil, donde gran parte de la población depende de recursos naturales (Albuquerque et al., 2017; Silva et al., 2017). Restaurar la Caatinga es más que recuperar su biodiversidad, las funciones ecológicas de la Caatinga atienden a la población local que depende de la fertilidad natural de los suelos para agricultura de corte y quema, la leña como principal fuente energética y la vegetación nativa para forraje natural, principalmente para los caprinos, criados tradicionalmente de manera extensiva (Melo et al., en prensa). Los grandes impactos y degradación de la Caatinga se dan mayormente por usos más intensivos, como la actividad agropecuaria intensiva y explotación comercial maderera (De Oliveira et al., 2012). Por lo tanto, recuperar ecológicamente la Caatinga es devolver funciones ecológicas a este ecosistema que ayuden a las poblaciones locales a sobrevivir de manera sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las agencias de financiación a la ciencia que han aportado recursos a nuestros grupos de investigación. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq y Ministério do Desenvolvimento Regional - MDR.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBUQUERQUE, U.P., E. de L. ARAÚJO, C.C. de CASTRO & R.R.N. ALVES, 2017. People and Natural Resources in the Caatinga. En: *Caatinga: The largest Tropical dry forest region in South America*. Springer, Cham, 303-333.
- ALBUQUERQUE, U.P. & C.F.C.B.R. ALMEIDA, 2002. Diversidade da Família Labiatae em Pernambuco. En: *Diagnóstico da diversidade de Pernambuco* (pp. 295-304). Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente.
- ALVES, M., M.F. ARAUJO, J.R. MACIEL & S. MARTINS, 2009. *Flora de Mirandiba*. APNE. 357 pp.
- ANTONGIOVANNI, M., E.M. VENTICINQUE, M. MATSUMOTO & C.R. FONSECA, (En prensa). Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. *Journal of Applied Ecology*.
- BENINI, R.M., F.E.B. LENTI, J.R.C. TYMUS, A.P.M. SILVA & I. INSERNHAGEN, 2017. Custos de restauração da vegetação nativa no Brasil. En: *Economia da restauração floresta* (pp. 20-37). The Nature Conservancy.
- BOVINI, M.G., 2020. *Sida*. En: *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9213>.
- BRANCALION, P., R. VIANI, B. STRASSBURG & R.R., RODRIGUES, 2012. Finding the money for tropical forest restoration. *Unasylva* 239: 41-50.
- CALMON, M., P.H.S. BRANCALION, A. PAESE, J. ARONSON, P. CASTRO, S.C. SILVA & R.R. RODRIGUES, 2011.

- Emerging threats and opportunities for large-scale ecological restoration in the Atlantic Forest of Brazil. *Restoration Ecology* 19(2): 154–158.
- CAPERS, R.S., R.L. CHAZDON, A.R. BRENES & B.V. ALVARADO, 2005. Successional dynamics of woody seedling communities in wet tropical secondary forests. *Journal of Ecology* 93(6): 1071–1084.
- CORBIN, J.D. & K.D. HOLL, 2012. Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology and Management* 265: 37–46.
- DE OLIVEIRA, G., M.B. ARAÚJO, T.F. RANGEL, D. ALAGADOR & J.A.F. DINIZ-FILHO, 2012. Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change. *Biodiversity and Conservation* 21(11): 2913–2926.
- GEI, M., D.M.A. ROZENDAAL, L. POORTER, F. BONGERS, J.I. SPRENT, M.D. GARNER, T.M. AIDE, J.L. ANDRADE, P. BALVANERA, J.M. BECKNELL, P.H. BRANCALION, G.A.L. CABRAL, R.G. CÉSAR, R.L. CHAZDON, R.J. COLE, G.D. COLLETTA & J. S. POWERS, 2018. Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests. *Nature Ecology & Evolution* 1.
- JOHNSON, W.L., V.E.J. EYS & H.A. FITZHUGH, 1986. Sheep and Goats in Tropical and Subtropical Agricultural Systems. *Journal of Animal Science* 63(5): 1587–1599.
- LATAWIEC, A.E., R. CROUZEILLES, P.H.S. BRANCALION, R.R. RODRIGUES, J.B. SANSEVERO, J.S. DOS SANTOS, M. MILLS, A.G. NAVE & B.B. STRASSBURG, 2016. Natural regeneration and biodiversity: a global meta-analysis and implications for spatial planning. *Biotropica* 48(6): 844–855.
- LORENZI, H., 2008. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. Instituto Plantarum. 640 pp.
- MANZANO, M.G. & J. NÁVAR, 2000. Processes of desertification by goats overgrazing in the Tamaulipan thorn scrub (matorral) in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 44(1): 117.
- MELO, F.P.L., F.A. BASSO & J.A. SIQUEIRA-FILHO, 2012. Restauração ecológica da Caatinga: desafios e oportunidades. En: *Flora das caatingas do Rio São Francisco: história natural e conservação*. Andrea Jakobsson Estúdio.
- MELO, F.P.L., L. PARRY, P.H.S. BRANCALION, S.R.R. PINTO, A.P. MANHÃES, J. FREITAS, G. GANADE, P. MELI & R.L. CHAZDON, 2021. Adding forest to water-energy food Nexus. *Nature Sustainability* 4(2): 85–92.
- MELO, F.P.L., 2017. The socio-ecology of the Caatinga: Understanding how natural resource use shapes an ecosystem. Springer, Cham, 369–382.
- MENEZES, T., R. CARMO, R. WIRTH, I.R. LEAL, MTABARELLI, A. LAURÊNIO & F.P. L. MELO, (En prensa). Introduced goats reduce diversity and biomass of herbs in Caatinga dry forest. *Land Degradation & Development*.
- MOREIRA, H.J.C. & H.B.N. BRAGANÇA, 2011. Manual de identificação de plantas infestantes: hortifrutí. FMC Agricultural Products, 1017 pp.
- NERI, M., D. JAMELI, E. BERNARD & F.P.L. MELO, 2019. Green versus green? Adverting potential conflicts between wind power generation and biodiversity conservation in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation* 17(3): 131–135.
- DE OLIVEIRA, A.C.P., A. NUNES, R.G. RODRIGUES & C. BRANQUINHO, 2020. From species presences to abundances: Using unevenly collected plant species presences to disclose the structure and functioning of a dryland ecosystem. *Ecological Indicators*, 113 pp.
- PEREIRA, S.R., V.A. LAURA & A.L.T. DE SOUZA, 2013. Superação de dormência de sementes como estratégia para restauração florestal de pastagem tropical. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 48(2): 148–156.
- REID, J.L., M.E. FAGAN & R.A. ZAHAWI, 2018. Positive site selection bias in me-

- ta-analyses comparing natural regeneration to active forest restoration. *Science advances* 4(5): eaas9143. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9143>
- REIS, A., F.C. BECHARA, M.B. ESPINDOLA, N.K. VIEIRA & L.L. SOUZA, 2003. Restauração de áreas degradadas: a nucleação como base para incrementar os processos sucessionais. *Natureza & Conservação* 1(1): 28-36.
- REIS, A., F.C. BECHARA & D.R. TRES, 2010. Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola* 67(2): 244-250.
- RODRIGUES, R.G., 2012. Paisagens do sertão setentrional. En: *Flora das caatingas do Rio São Francisco: história natural e conservação*. Andrea Jakobsson Estúdio.
- SILVA, J.M.C., I.R. LEAL & M. TABARELLI, 2017. Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America. Springer International Publishing.
- SPECHT, M.J., B.A. SANTOS, N. MARSHALL, F.P.L. MELO, I.R. LEAL, M. TABARELLI & C. BALDAUF, 2019. Socioeconomic differences among resident, users and neighbour populations of a protected area in the Brazilian dry forest. *Journal of Environmental Management* 232: 607-614.
- TEIXEIRA, L.H., B.F. OLIVEIRA, F.S. KRAH, J. KOLLMANN & G. GANADE, 2020. Linking plant traits to multiple soil functions in semi-arid ecosystems. *Journal of Arid Environments* 172: 104040.
- WELLS, H. & L. WINOWIECKI, 2017. Critical review of dryland restoration in Tanzania: Elements of success and failure and technologies employed. World Agroforestry Centre (ICRAF).

Recibido: 12/2020
 Acceptedo: 04/2021

1) Vista parcial de un área cerca del canal, con la desestructuración del suelo y la ubicación de puntos de implantación de núcleos. (Foto: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 2) Vista parcial de un área cerca del canal, con siembra de plántulas en núcleos de aceleración de regeneración natural con especies secundarias (NARN-S). (Foto: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 3) Vista parcial de un área cerca del canal, con implantación de diferentes modelos de núcleos. (Foto: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 4) Vista parcial de un área en recuperación con núcleo de aceleración de regeneración natural con pioneras (NARN-P) en desarrollo. (Foto: Diogo Gallo de Oliveira). 5) Vista parcial de un área en recuperación con núcleo de aceleración de regeneración natural con especies secundarias (NARN-S) en desarrollo. (Foto: Diogo Gallo de Oliveira). 6) Implantación de un núcleo de alta diversidad (NAD). (Foto: Diogo Gallo de Oliveira). 7) Siembra directa de baja densidad (SBD). (Foto: Karen Lima). 8) Paso desgarrador del suelo después de la siembra. (Foto: Robson Fartes). 9) Vista parcial de un área en recuperación con siembra directa de baja densidad (SBD). (Foto: Karen Lima)

1) Partial view of an area near the canal, with the destructuring of the soil and the location of points for implantation of nuclei. (Photo: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 2) Partial view of an area near the canal, with seedlings planting in natural regeneration acceleration nuclei with secondary species (NARN-S). (Photo: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 3) Partial view of an area near the canal, with implantation of different nuclei models. (Photo: Geraldo Faustino dos Santos Sobrinho). 4) Partial view of an area in recovery with natural regeneration acceleration nuclei with pioneers (NARN-P) under development. (Photo: Diogo Gallo de Oliveira). 5) Partial view of an area in recovery with natural regeneration acceleration nuclei with secondary species (NARN-S) under development. (Photo: Diogo Gallo de Oliveira). 6) Implantation of a high diversity nuclei (NAD). (Photo: Diogo Gallo de Oliveira). 7) Low density direct seeding (SBD). (Photo: Karen Lima). 8) Harrowing step of the soil after sowing. (Photo: Robson Fartes). 9) Partial view of an area in recovery with low density direct seeding (SBD). (Photo: Karen Lima)

