

PROYECTOS DE
ESTIMULACIÓN
DE **LLUVIAS**
2024



El arte de transformar lo imposible en realidad

PRÓLOGO



Héctor Manuel Arias Rojo, Ph.D. ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE LA CONAZA

El 12 de febrero del presente año se cumplieron cuatro años cuando la empresa StarUp Renaissance S de RL y de CV (SRE) cumplió el compromiso con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) de establecer un Proyecto Piloto de Estimulación de Lluvia en el estado de Baja California con el objetivo de mitigar la sequía que amenazaba para el año 2021. Este proyecto fue en cooperación con la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), a través de la Fuerza Aérea Mexicana (FAM).

Siete eventos generaron un incremento del 19% de lluvia con respecto a la cantidad predicha por modelos meteorológicos, una condición que la SADER buscaba, a través de la supervisión de la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA). El criterio fue que el incremento fuera mayor de 5%. El incremento no sólo fue mayor del criterio establecido, sino que, esta tecnología se aplicó, en una sola ocasión, para apagar totalmente un incendio que amenazaba la zona metropolitana de Monterrey, en la Sierra Santiago, el 31 de marzo con el uso de esta tecnología.

En los ciclos PV 2021, PV 2022 y PV 2023, la empresa mitigó la sequía en el noroeste de México, en las zonas de los desiertos de Sonora (Sonora y Sinaloa) y Desierto Chihuahuense (Chihuahua y Región Lagunera) y otros estados más, con financiamiento federal y estatal.

En mi papel como supervisor de Proyectos Estratégicos de la SADER a través de la CONAZA, he observado el desempeño más que satisfactorio de la empresa durante cuatro años. Con la información que tengo, puedo ver que este año 2025, va a ser un año difícil por varias crisis mundiales asociadas a sequías y elevadas temperaturas. Sin embargo, así como muchos identifican las crisis con oportunidades, estoy seguro de que la empresa va a salir adelante y va a llevar soluciones no sólo a la sequía en México, sino en otros países, que están buscando soluciones efectivas a las crisis de energía, a países que dependen de la energía hidroeléctrica (Región Andina en Sudamérica), a productores de regiones de alta siniestralidad por cultivos rentables (cañeros del Golfo de México); así como a apagar incendios (Monterrey y Chihuahua).

Hago estos comentarios porque he observado, con gran satisfacción, la preparación de la empresa en su equipo de meteorólogos, su equipo de pilotos, sus expertos en el manejo de proyectos y manejadores de Sistemas de Información Geográfica y Sensoria Remota, así como el desarrollo los equipos de desarrollo metalmecánico y eléctrico, sus áreas de administración y ventas. Todos están conformados por jóvenes con altas capacidad y motivación, empeñados en la búsqueda de innovaciones tecnológicas y nuevos retos.

Mis mejores deseos para que sigan proporcionando la calidad de los servicios que brindan. ☁️



LA HUASTECA



■ Luis
García Saavedra
COORDINADOR



■ Luis Rodrigo
García Aguilar
OPERADOR DE REACTIVO



■ Brian Enrique
Ávila Ortega
COORDINADOR DE PLUVIÓMETROS



■ Alejandra
Báez Flores
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

INGENIOS AZUCAREROS DE LA HUASTECA

Este es un proyecto realizado en coordinación con los Ingenios Azucareros de la Huasteca, a través del Grupo Industrial Pantaleón. A diferencia de otras modalidades, en este proyecto el objetivo se focalizó en la estimulación para complementar el **Riego Directo**. Nuestro reto fue mantener las precipitaciones necesarias y adecuadas para el desarrollo vegetativo y productivo de la caña de azúcar, en una superficie de 3,278,087.86 ha, específicamente en los campos cañeros de los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz. Se realizaron 26 vuelos, entre el día 18 de mayo y 27 de septiembre, con la liberación de 2,600 litros de Rainmate® cubriendo un acumulado de 292,680.00 km² de trabajo, en una aeronave modelo King Air 90 Matricula XB-SJU, con resultados exitosos que nos generan orgullo.

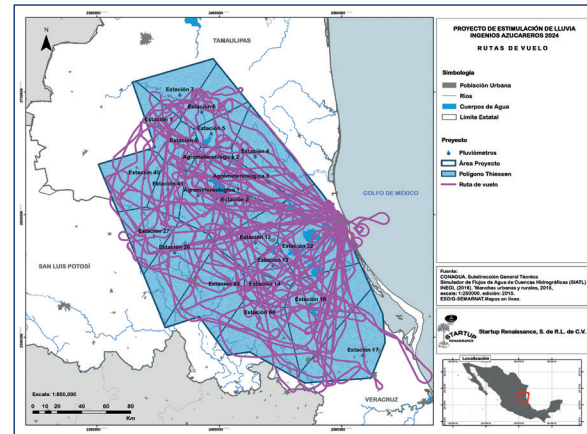


Figura 1. Mapa de localización del proyecto con las trayectorias de los vuelos.

Se realizaron 26 vuelos de estimulación.		
Distancia efectiva recorrida dentro del polígono de trabajo	Superficie cubierta dentro del polígono de trabajo	Reactivo Rainmate® aplicado
9,756 km	292,680 km²	2,600 lt
Lámina precipitada acumulada durante los días de vuelo:		
7,380 millones de m³		
Incremento logrado de precipitación, sobre lo pronosticado los días de vuelo:		
Nubes dinámicas con incremento del 63.23% sobre lo pronosticado, contribuyendo el viento a la dispersión del reactivo		



Sensores remotos / Índice de verdor (NDVI)

Imágenes del índice de vegetación (NDVI) en el periodo previo, durante y posterior a la estimulación. Polígono rosa: área de trabajo; polígono azul: área externa.

El registro promedio del NDVI al inicio del proyecto era mayor en el área externa. Una vez que se comenzó a estimular, los valores promedio de NDVI comenzaron a ser superiores en el polígono de trabajo y en el área de influencia o estimulación, lo que demuestra un efecto positivo en la vegetación, sea esto referido a un aumento de biomasa y a una recuperación del verdor de la vegetación. La

diferencia entre los valores del inicio vs el final de la estimulación muestra un aumento de más del 30% en las áreas estimuladas contra un 20% para el área externa. Al final del periodo, el promedio de NDVI más alto se registró en el área de influencia, lo que se traduce en productividad y también en un incremento importante en la captura de carbono en el polígono de trabajo.

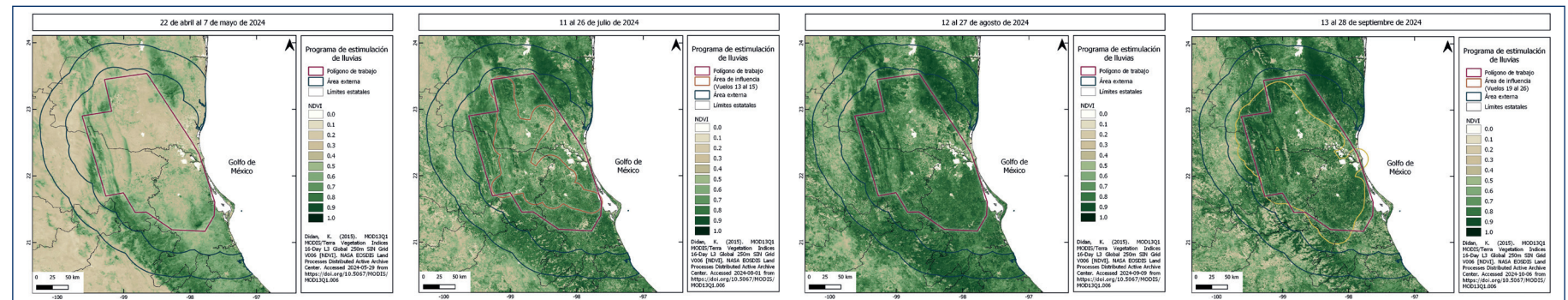


Figura 2. Para el índice de Vegetación NDVI los registros y el promedio muestran una tendencia positiva para los tres polígonos analizados.

Contribución en la cobertura vegetal

Dentro del polígono de trabajo se registran diez tipos de vegetación, siendo el pastizal el de mayor superficie, seguido por la selva y la agrícola de temporal. Con base en estos tipos de vegetación se analiza la fotosíntesis neta ($\text{kg C}/\text{m}^2$).

Para este análisis se observa que los tipos de vegetación responden más o menos de manera similar, según se desarrollan los vuelos de estimulación. El manglar y el bosque, seguido por el palmar y la selva son los tipos de vegetación que presentan los promedios de kg de C por m^2 más altos.

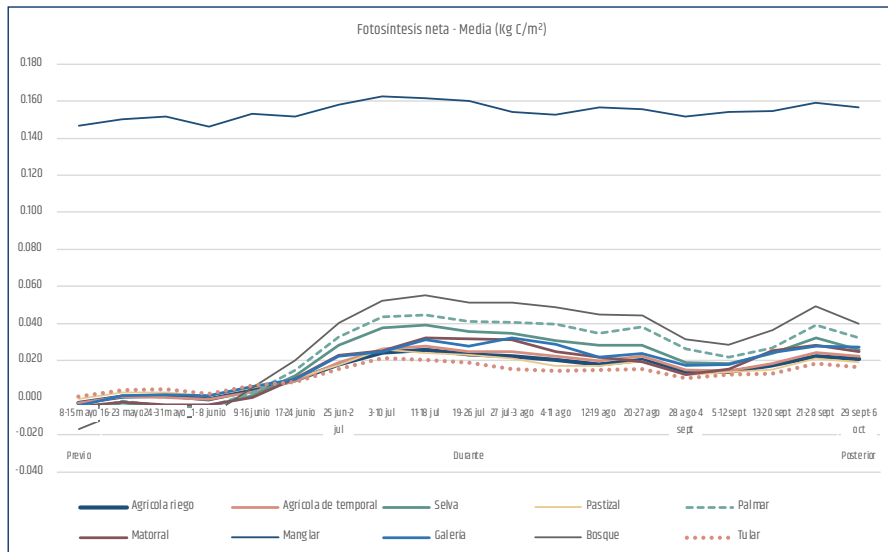


Figura 3. Media de fotosíntesis neta por tipo de cobertura y uso de suelo (modificado de INEGI, 2016), dentro del polígono de trabajo, previo, durante y posterior al periodo de estimulación.



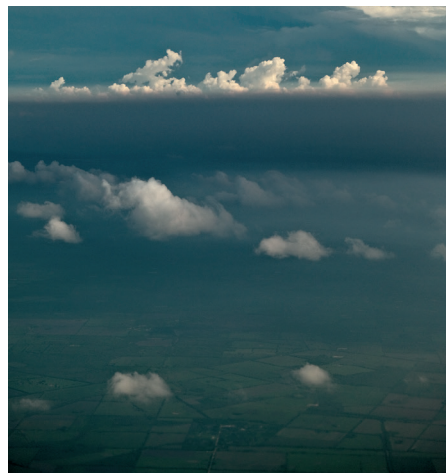
Precipitación

Se realizaron 26 vuelos, entre el día 18 de mayo y el 27 de septiembre. En todos ellos se registró precipitación con una gran variación en cuanto a la lámina. Durante los vuelos siempre se observó que las nubes precipitaban después de aplicar Rainmate®, pero no siempre se reflejó en algunos pluviómetros.

Es de resaltar que los días que se voló, se logró un 74% más de lluvia sobre los días que no se hizo. Adicionalmente se registró un incremento de 63.3% sobre lo pronosticado, donde el viento ayudó a que el efecto del Rainmate® llegara a mayor distancia.

En esta evaluación no se consideraron los registros de los días que presentaron condiciones de tormenta, ya que por sus volúmenes una sola condición de este tipo distorsiona las estadísticas globales, por lo que estos eventos los consideramos como "lluvias adicionales" y no se incluyeron en los análisis de lo pronosticado y lo precipitado, no obstante realizar vuelos en estos casos.

En general, las imágenes muestran que las celdas de precipitación con valores altos están frecuentemente asociadas a las rutas de vuelo o contiguas a estas. El mejor indicador es la lluvia acumulada lograda los días de vuelo y se estima que se precipitaron $7,379,546,783.48 \text{ m}^3$ en el polígono de trabajo, que ayudaron a lograr completar el ciclo del cultivo.



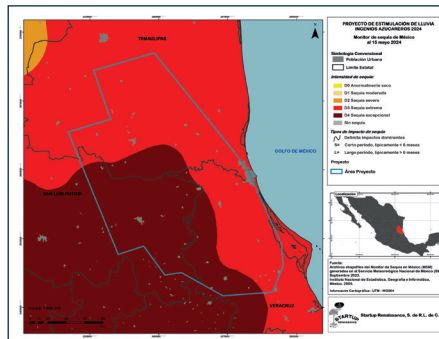
Contribución al llenado de presas

Las cinco presas dentro del área de influencia del proyecto tienen una capacidad de almacenamiento de 1,714.54 hm³ de agua, los cuales en su mayoría son destinados a agricultura. Al final de la ejecución del proyecto, al 30 de septiembre, las presas dentro del área de influencia en total registraron 1,982.42 hm³; superando por lo tanto su capacidad máxima de almacenamiento.

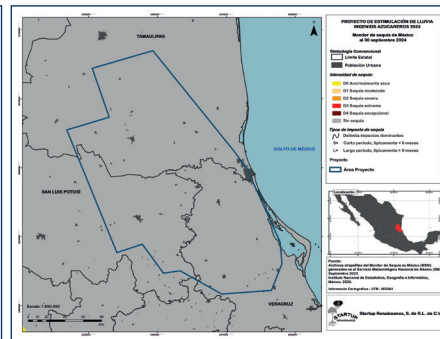


Contribución a la mitigación de sequía

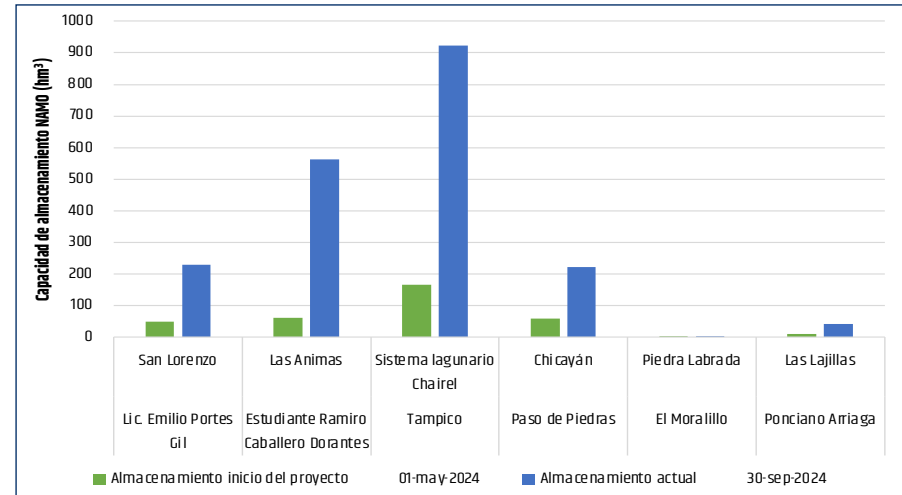
Los mapas nacionales publicados por el Monitor de la Sequía en México muestran que para la fecha que inicio el proyecto, el 15 de mayo de 2024, los 53 municipios que se localizan dentro del polígono de trabajo de los estados de San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz; se encontraban dentro de alguna categoría de sequía D3 (sequía extrema) o D4 (sequía excepcional). Para finales del proyecto, según datos de la CONAGUA con el Monitor de la Sequía, la categoría en el área del proyecto es **SIN SEQUÍA**.



Evolución de la sequía al 15 mayo de 2024 al inicio del proyecto



Evolución de la sequía al 30 de septiembre de 2024 al final de proyecto



Resultados

Se lograron resultados altamente satisfactorios, considerando los indicadores en general, a pesar de las condiciones adversas tanto al inicio como al final del proyecto.

Los indicadores nos sugieren que el proyecto **cumplió** con su principal objetivo, de contener y revertir la sequía que avanzaba a grandes pasos, ya que paralelamente se logró que la vegetación continuara desarrollándose, incluida la caña de azúcar, y que las presas no disminuyeran sus volúmenes almacenados; logrando al final del proyecto que su almacenamiento llegara al 116% de su capacidad, no obstante haber continuado haciendo entrega de agua durante el período de ejecución de este proyecto.

Hacia la mitad de nuestras operaciones, el avance de resultados fue tan satisfactorio que resultó necesario suspender los vuelos debido al exceso de humedad en el suelo, reiniciándolos una vez que se consideró que la caña requería agua. Todo esto se manejó de manera certera con los productores.



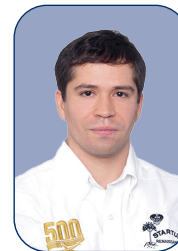
CHILE CHILE



■ Martín
Máynez Chavarría
COORDINADOR



■ Víctor Alfonso
Torres Sánchez
SUPERVISOR DE VUELOS



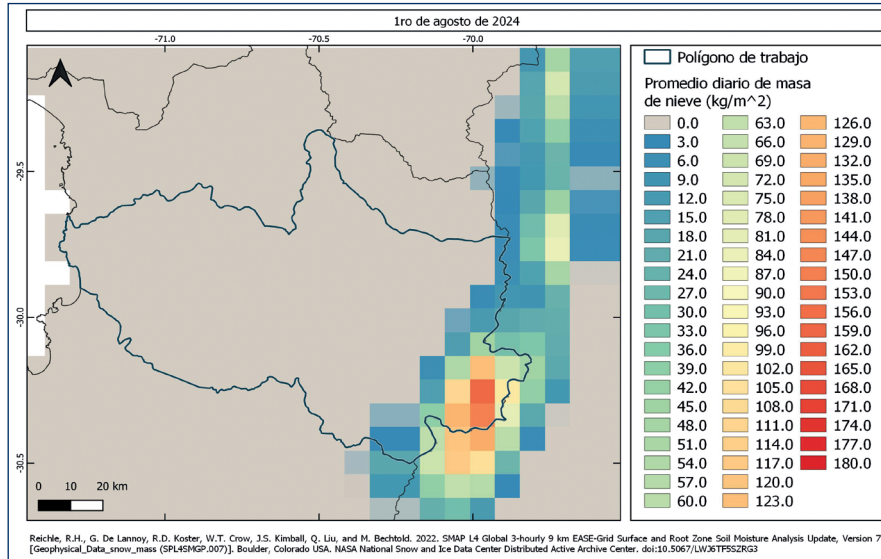
■ Luis Daniel
Máynez Alcalá
OPERADOR DE REACTIVOS



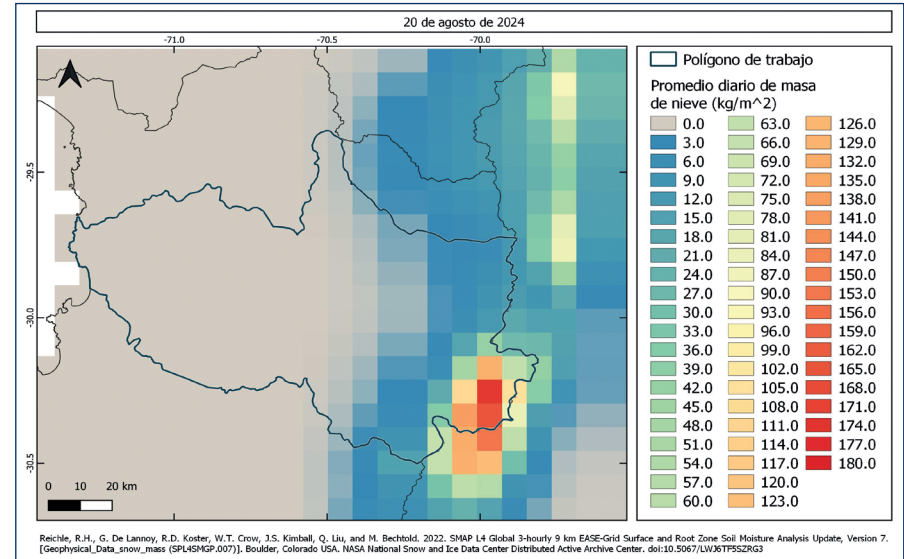
■ Denise
Lubinsky Jinich
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

Evolución de la acumulación de nieve

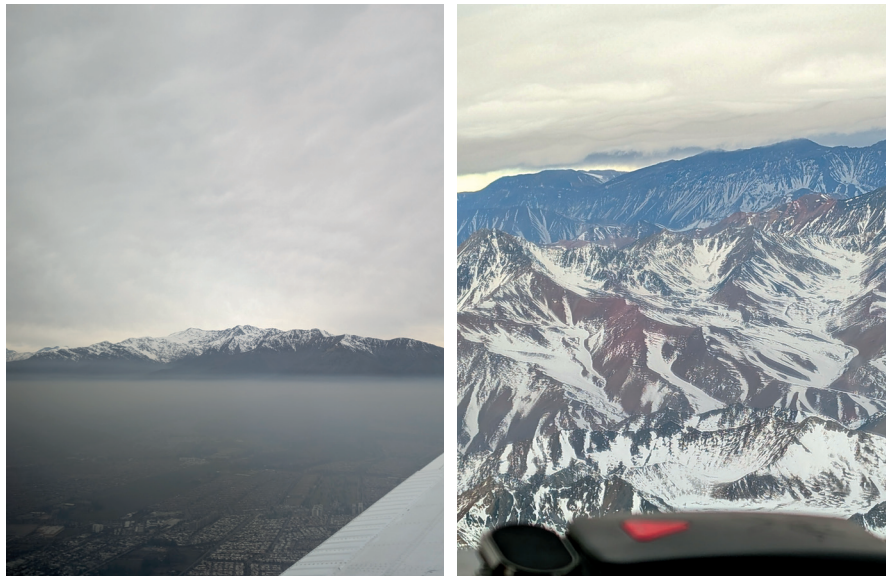
De manera individual, se observa un aumento en el volumen de nieve a partir del vuelo 2, y de manera general, un aumento en el volumen en la porción sureste del área de trabajo, cerca de los sitios El Tapado 2, La Laguna y Llano de las Liebres, que fueron los tres sitios con los registros más altos de volumen de nieve.



Vuelo 1: 1 agosto-2024 (inicio del proyecto) · Polígono de trabajo: línea azul



Vuelo 5: 20 agosto-2024 (fin del proyecto) · Polígono de trabajo: línea azul



De manera individual, se observa un aumento en el volumen de nieve a partir del vuelo 2, y de manera general, un aumento en el volumen en la porción sureste del área de trabajo, cerca de los sitios El Tapado 2, La Laguna y Llano de las Liebres, que fueron los tres sitios con los registros más altos de volumen de nieve.

Precipitación

La precipitación registrada en pluviómetros y/o Sensores Remotos para los días de vuelo fue del 100%, es decir, se registró lluvia todas las veces que se voló y se aplicó Rainmate®, en al menos un sitio.

Caso	Descripción	Precipitación (mm)		Incremento (%)
		Pronóstico acumulado	Acumulado en pluviómetros	
1	Análisis total	363.3	640.3	76.23
2	Análisis de nubes dinámicas	302.7	598.57	Llegando a más del 95% durante las lluvias más intensas



Como resultado de la estimulación se registraron en el total del polígono 640.3 mm acumulados, que versus los 363.3 mm pronosticados, corresponde a un 76.23% de incremento (eficacia), y que generaron 215,945,165.0 m³ de agua los días de vuelo. Esto adicional a la nieve.

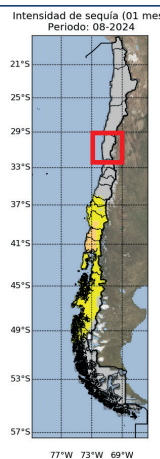
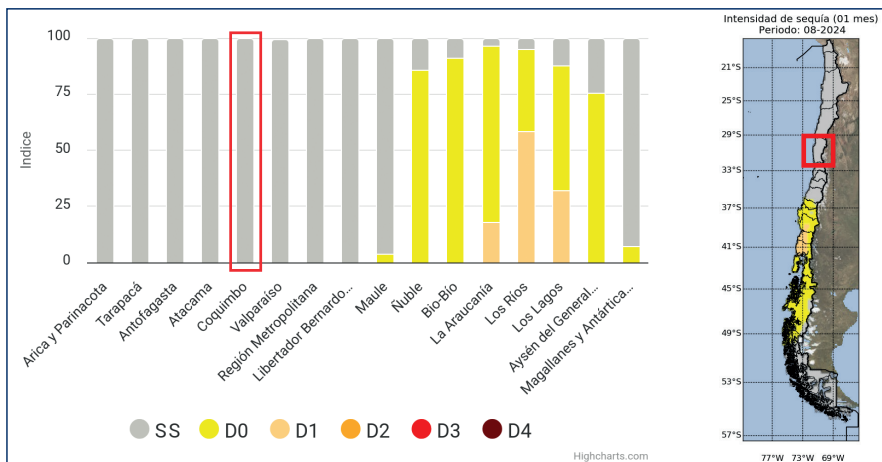
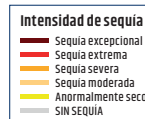
Para este proyecto, con relación a las nubes dinámicas los efectos pudieron manifestarse a distancias mayores de 50 kilómetros, considerando que en la mayoría de los vuelos se enfrentaron a vientos de alta velocidad con dirección hacia las partes altas de las montañas, dispersando el reactivo muy rápido y favorablemente para las operaciones, lo que se refleja en lo precipitado con el efecto del viento.



Contribución a la mitigación de la sequía

A nivel de región Coquimbo, área donde se encuentra el proyecto, la sequía se redujo totalmente en comparación con el mes de inicio del proyecto, donde el 95.5% de la región presentaba una condición ANORMALMENTE SECO (D0), pasando a categoría **SIN SEQUÍA** en el 100% del territorio.

Categoría de sequía	SS	D0	D1	D2	D3	D4
Porcentaje del área con sequía	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Situación de la sequía en la región de Coquimbo, al finalizar el proyecto (Dirección Meteorológica de Chile, Servicios Climáticos).

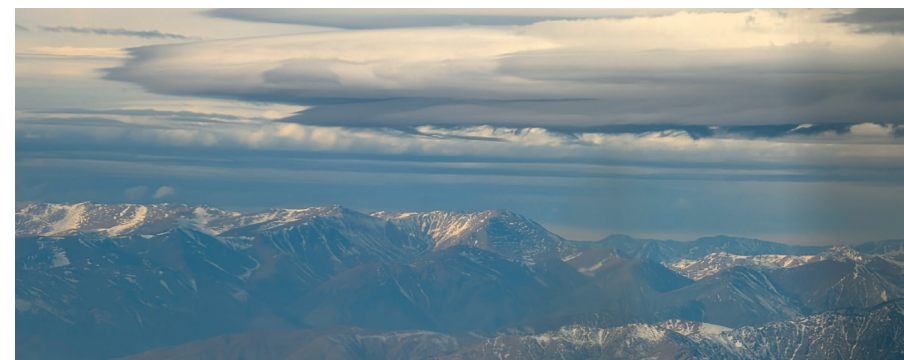
Resultados

Se logró exitosamente el principal objetivo del proyecto, que inicialmente planteaba incrementar la cantidad de nieve en la zona Andina, pero también se generaron importantes volúmenes de agua a través de escurrimientos, como forma de reserva. Es muy importante este resultado ya que representa la desaparición del estrés por sequía en todas las actividades del área, donde resaltan las agropecuarias, forestales, vida silvestre y consumo humano.

El comportamiento observado desde los primeros vuelos arrojó resultados muy favorables, que permitían estimar que las precipitaciones logradas significaban el fin de una sequía que afectaba esta región desde hacía 14 años, y que es congruente con el monitor de sequía.

El comportamiento de la nieve precipitada, de acuerdo a las imágenes de satélite, muestra que los efectos se registraron dentro de la cuenca de interés, por lo que los vuelos estuvieron bien diseñados, considerando las alturas, velocidad y dirección del viento.

Las operaciones de estimulación de nieve sobre la cordillera representaron un gran reto, dada la peligrosidad de la zona por las elevadas cúspides y corrientes de viento. Todo un equipo interdisciplinario se involucró para diseñar meticulosamente cada vuelo, calculando todas las variables posibles. Se resalta la gran pericia y capacidad técnica de los pilotos chilenos a cargo.





MICHOACÁN, NORTE



■ Carlos
Carbajal Hernández
COORDINADOR



■ Juan Carlos
Díaz Leocadio
OPERADOR DE REACTIVO



■ Lauro Antonio
Carrillo Trueba
COORDINADOR DE PLUVIÓMETROS



■ Pamela
García Aguilar
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

MICHOACÁN, ZONA NORTE

Como parte de las distintas acciones contempladas en el Plan Hídrico de Mitigación para la Sequía 2024, instaurado por el Gobierno del Estado de Michoacán, se implementó en la zona norte del estado, el Proyecto de Estimulación de Lluvias. Este dio inicio el 28 de mayo y finalizó el 28 de agosto de 2024, dentro de un polígono de trabajo de 2,610,547.67 ha, con influencia en 17 cuencas: Lago de Cuitzeo, Lago de Pátzcuaro, Laguna de Yuriría, Río Angulo, Río Bajo Balsas, Río Cupatitzio, Río Cutzamala, Río Duero, Ríos Lerma 3 al 7, Río Paracho-Nahuatzen, Río Tacámbaro, Río Tepalcatepec y Río Zirahuén (figura 1). Se realizaron un total de 20 vuelos, de los cuales del 01 al 06 se llevaron a cabo en una aeronave Pilatus PC12 y a partir del vuelo 07 se realizaron en una aeronave Turbocomander 690, ambos proporcionados por el Gobierno del Estado de Michoacán.

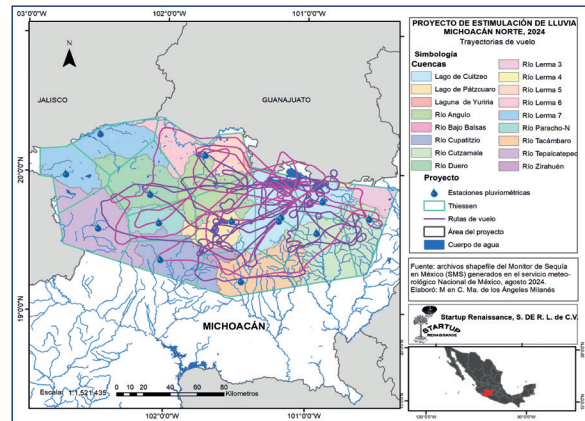


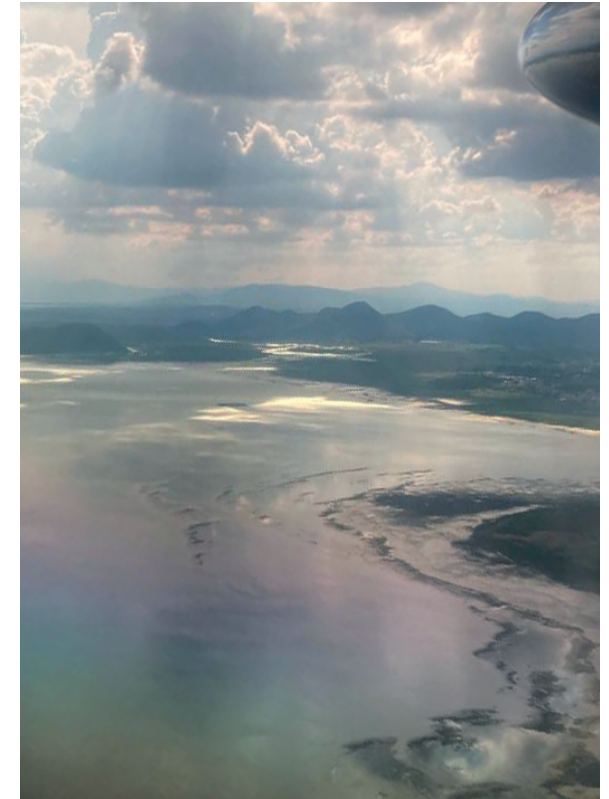
Figura 1. Mapa de localización del proyecto con las trayectorias de los vuelos.



Se realizaron 20 vuelos de estimulación.		
Distancia efectiva recorrida dentro del polígono de trabajo	Superficie cubierta dentro del polígono de trabajo	Reactivo Rainmate® aplicado
9,473 km	284,190 km²	2,000 lt

Lámina precipitada acumulada durante los días de vuelo:
4,012 millones de m³

Incremento logrado de precipitación, sobre lo pronosticado los días de vuelo:
33.79% con nubes dinámicas.



■ Sensores remotos / Índice de verdor (NDVI)

Para el NDVI o índice de vegetación y fotosíntesis, los registros indican incremento en el verdor de la vegetación y el aumento de la biomasa, mediante la medición del carbono en base a la actividad fotosintética.

También los registros y el promedio muestran una tendencia positiva y siempre mayor para el polígono de trabajo y del área de influencia, respecto a los valores del área externa con las que se comparan. El análisis general indica que el polígono de trabajo y el área de influencia presentan el valor diferencial (la ganancia y pérdida por periodo) más positivo del NDVI. Polígono rosa: polígono de trabajo; polígono azul: área externa de comparación.

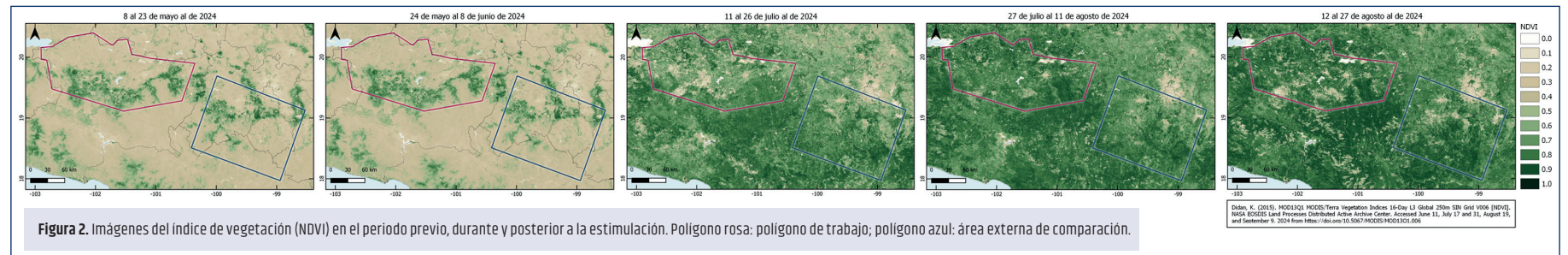


Figura 2. Imágenes del índice de vegetación (NDVI) en el período previo, durante y posterior a la estimulación. Polígono rosa: polígono de trabajo; polígono azul: área externa de comparación.



Contribución en la cobertura vegetal

Dentro del polígono de trabajo se registran ocho tipos de vegetación, siendo el bosque de pino-encino el de mayor superficie, seguido por la vegetación agrícola de temporal y agrícola de riego. Con base en estos tipos de vegetación se analiza la fotosíntesis neta (Kg C/m^2), que se utiliza como base para calcular la cantidad de carbono por hectárea. Para este análisis se observa que los tipos de vegetación responden más o menos de manera similar, según se desarrollan los vuelos de estimulación. La vegetación agrícola de riego es la que presenta el promedio más alto. La conversión de fotosíntesis neta a carbono total indica que el bosque (por su extensión) es el que acumula más carbono, seguida por la vegetación agrícola de temporal.

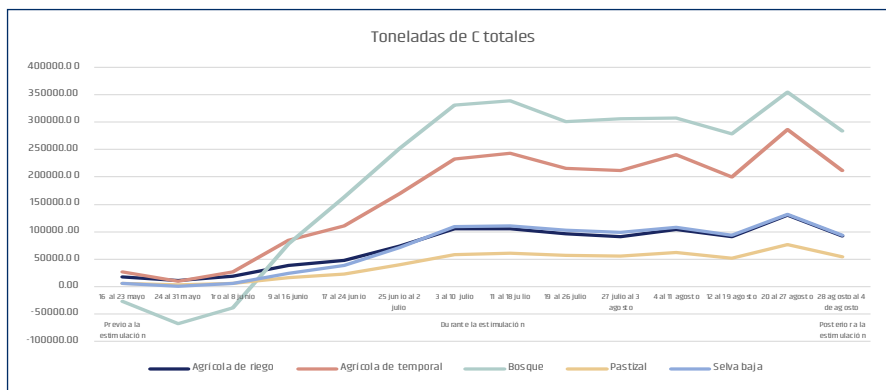


Figura 3. Se muestra la evolución de las toneladas de carbono por hectárea, para el total de la superficie de cada tipo de cobertura de vegetación significativa para actividades productivas (vegetación agrícola de riego, de temporal) y bosque, pastizal y selva baja, con base en la serie VII de INEGI del año 2018. Estos valores derivan de la cantidad de carbono (Kg de carbono por m^2) y de la superficie total que cubre el tipo de cobertura.

Precipitación

La precipitación registrada en pluviómetros y/o sensores remotos para los días de vuelo fue del 100%, es decir, se registró lluvia todas las veces que se voló y se aplicó Rainmate®, en al menos un sitio.

Caso	Descripción	Precipitación (mm)		
		Pronóstico acumulado	Acumulado en pluviómetros	Incremento (%)
1	Análisis total	1,935.70	2,197.91	13.55
2	Análisis de nubes estáticas	711.00	886.71	24.71
3	Análisis de nubes dinámicas	752.90	1,007.34	33.79



Para la variable precipitación, las imágenes muestran que las celdas de precipitación están claramente asociadas a las rutas de vuelo o aledañas a estas, y que eventualmente hay celdas de precipitación con registros altos fuera de las rutas y en el área externa, que se pueden asociar a fenómenos y dinámica atmosférica natural.

Contribución al almacenamiento de las presas

Dentro del área de influencia del proyecto se encuentran 16 presas, las cuales fueron monitoreadas a lo largo del proceso de estimulación. Al inicio, éstas registraban 486.88 hm³ de almacenamiento. Conforme avanzaban los vuelos, el registro fue de 584.23 hm³ almacenados.

Nombre de la presa	NAMO almacenamiento (hm ³)	Inicio de proyecto 28 mayo 2024 (hm ³)	Fin del proyecto 29 agosto 2024 (hm ³)	% de llenado
Mata de Pinos	15.67	7.61	9.361	59.74
Wilson	25.34	1.933	10.984	43.35
Cointzio	50.84	14.33	41.065	80.77
Copándaro de Dolores	2.75	0.211	0.211	7.67
De Gonzalo	8.83	0.98	0.098	1.11
San Antonio	28.67	2.212	4.459	15.55
Jaripo	6.28	1.971	2.214	35.25
Pátzcuaro	646.58	334.16	336.614	52.06
Laguna del Fresno	10.29	0.438	10.218	99.30
Tres Mezquites	14.59	0.458	4.415	30.26
La Ciénega	18.52	3.609	18.435	99.54
El Rosario	194.45	84.13	98.29	50.55
Pucuateo	9.48	1.326	3.521	37.14
Sabaneta	5.04	1.301	2.065	40.97
La Laguna	60.54	29.96	34.222	56.53
Urepetiro	8.28	2.248	8.058	97.32
Total	1,106.15	486.88	584.23	52.81

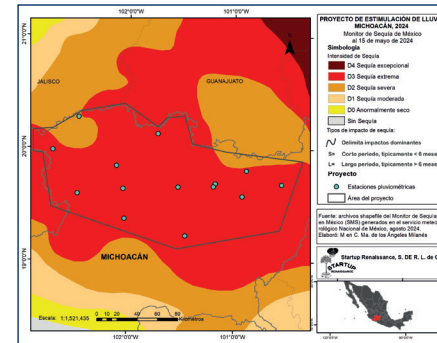
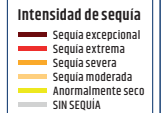


Resultados en el almacenamiento de las presas con respecto al NAMO (hm³) al inicio y al final del proyecto. Es de resaltar que se logró un incremento del 20% en el almacenamiento de las presas respecto al inicio del proyecto, lo que se traduce en 97.35 hm³, considerando además que una parte de esta agua es gracias a la precipitación estimulada. Fue evidente durante el proyecto, la recuperación gradual de los lagos.

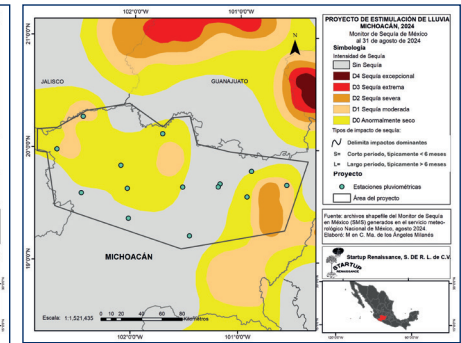
Contribución a la mitigación de la sequía

De acuerdo al monitor de sequía en México (MSM) generado en el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN), al 31 de agosto se reportaban sólo 34 municipios en el estado con alguna categoría de sequía, siendo que al inicio del proyecto eran 111 los afectados. Durante la ejecución del proyecto el porcentaje **SIN SEQUÍA** en el estado, se incrementó al 62.3%, eliminándose las categorías de sequía excepcional y sequía extrema (D3 y D4).

Tipo de sequía	Porcentaje de área con sequía					
	SS	D0	D1	D2	D3	D4
Sequía al 15 de mayo de 2024	10.1	9.5	7.2	18.4	54.8	0.0
Sequía al 31 de agosto 2024	62.3	24.3	11.5	1.9	0.0	0.0



Categorías de sequía en el Estado de Michoacán al inicio del proyecto



Categorías de sequía en el Estado de Michoacán después del proyecto

Es importante observar la evolución de la sequía dentro del polígono de trabajo, durante la ejecución del proyecto. Es claro que, de estar casi en su totalidad en sequía extrema, al final desaparece esta condición, migrando gran parte hacia anormalmente seco; y alrededor del 40% a **SIN SEQUÍA**. Este es un indicador claro del resultado del proyecto.

Resultados

El proyecto cumplió con los principales objetivos planteados, al lograr mitigar en gran medida los efectos de la sequía sobre los sectores productivos más sensibles al comportamiento de las lluvias, y el indicador directo de esto es que se obtuvo un incremento de precipitación sobre lo pronosticado los días de vuelo, llegando hasta 33.79% en casos de nubes dinámicas. Al cierre del proyecto podemos ver que se logró una mayor precipitación dentro del polígono de trabajo y sobre las áreas sobrevoladas. Esto se ve reflejado en todos los indicadores que utilizamos para evaluar los efectos logrados para contrarrestar la sequía que se presentaba hasta junio, con pronósticos alarmantes.

Los sensores remotos nos indican que se lograron incrementos en el verdor de la vegetación dentro del polígono de trabajo durante la aplicación del proyecto, lo que tiene un efecto directo sobre la cobertura vegetal y por lo tanto para la ganadería y captura de carbono, principalmente, significando esto una aportación importante para la mitigación de los efectos de la sequía y al incremento del nivel de los lagos, lo cual deja una gran satisfacción a los que participamos en este proyecto.



MICHOACÁN, SUR



■ Carlos Carbajal Hernández
COORDINADOR



■ Victor Alfonso Torres Sánchez
ASESOR DE VUELO



■ Juan Carlos Díaz Leocadio
OPERADOR DE REACTIVO



■ Lauro Antonio Carrillo Trueba
COORDINADOR DE PLUVIÓMETROS



■ Bertha García Capitanachi
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

MICHOACÁN, ZONA SUR

Este proyecto se realizó en coordinación entre la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER Federal), la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) y la Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas (CEAC). El objetivo era enfrentar el embate de la sequía en la zona sur del estado de Michoacán, para lo cual se diseñó un polígono de trabajo con una superficie de 1,997,686.69 ha, incluyendo las cuencas del Río Tepalcatepec, Río Tacámbaro, Río Bajo Balsas, Río Medio Balsas, Río Cupatitzio, Río Cutzamala, Río Nexpa, Río Chula y Río Acapulcan (figura 1). Se realizaron 15 vuelos de Estimulación de Lluvias, del 15 de junio al 27 de agosto de 2024, en una aeronave modelo Rockwell 690B Turbo Commander, proporcionada por el Gobierno del Estado.

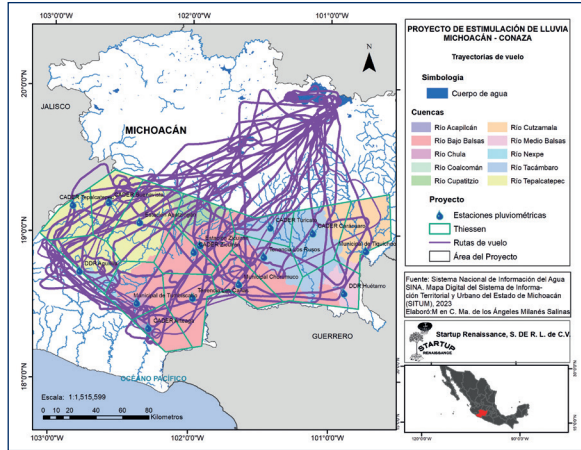


Figura 1. Mapa de localización del proyecto con las trayectorias de los vuelos.

Se realizaron 15 vuelos de estimulación.		
Distancia efectiva recorrida dentro del polígono de trabajo	Superficie cubierta dentro del polígono de trabajo	Reactivo Rainmate® aplicado
4,980 km	149,400 km²	1,500 lt

Lámina precipitada acumulada durante los días de vuelo:
1,635 millones de m³

Incremento logrado de precipitación, sobre lo pronosticado los días de vuelo:
26.7 % en todo el polígono y 56.2 % con las nubes dinámicas, de acuerdo a sensores remotos.



■ Sensores remotos / Índice de verdor (NDVI)

Para el NDVI o índice de vegetación y fotosíntesis, los registros indican incremento en el verdor de la vegetación y el aumento de la biomasa mediante la medición del carbono con base en la actividad de fotosíntesis.

Para el NDVI los registros y el promedio muestran una tendencia positiva y siempre mayor para el polígono de trabajo y del área

de influencia, respecto a los valores del área externa con las que se comparan. El valor final registrado es mayor en el polígono de trabajo, sin embargo, el aumento en el área de estimulación siempre fue mayor que en las otras dos áreas, debido a la mayor precipitación. En el último periodo el promedio del NDVI aumentó sólo uno o dos puntos, pero se debe considerar que dentro de todas las áreas ya se había alcanzado el valor máximo del NDVI.

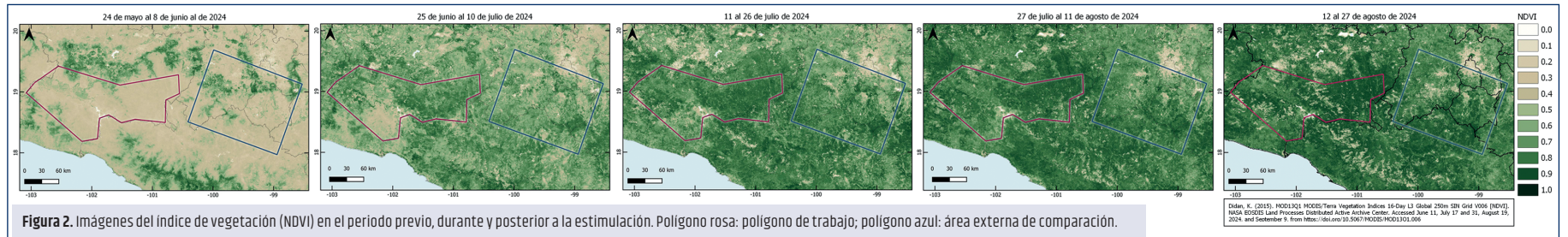


Figura 2. Imágenes del índice de vegetación (NDVI) en el periodo previo, durante y posterior a la estimulación. Polígono rosa: polígono de trabajo; polígono azul: área externa de comparación.

Contribución en la cobertura vegetal

Dentro del polígono de trabajo se registran nueve tipos de vegetación, siendo la selva baja la de mayor superficie, seguida por el bosque de pino-encino y la vegetación agrícola de temporal. Con base en estos tipos de vegetación se analiza la fotosíntesis neta (Kg C/m^2), que se utiliza como base para calcular la cantidad de carbono por hectárea. Para este análisis se observa que los tipos de vegetación responden más o menos de manera similar, según se desarrollan los vuelos de estimulación, con excepción de la selva baja que presenta un comportamiento atípico. El bosque, seguido por el pastizal y la vegetación agrícola de temporal son los que presentan los promedios más altos. La conversión de fotosíntesis neta a carbono total indica que la selva baja (por su extensión) es la que acumula más carbono, seguida por el bosque y la vegetación agrícola de temporal.

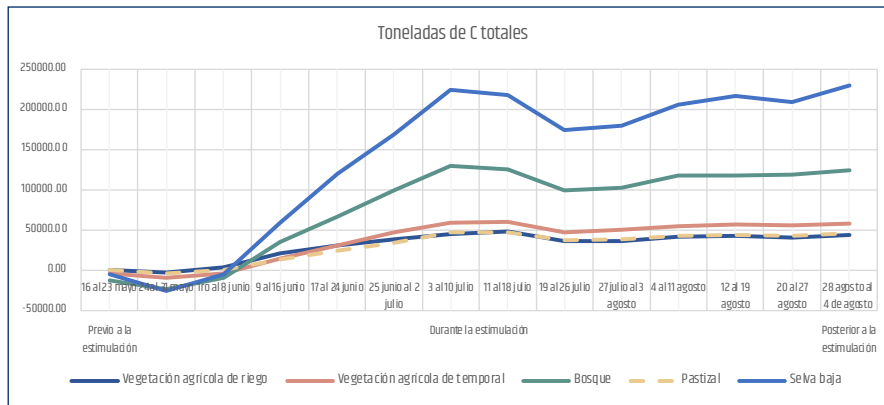


Figura 3. Se muestra la evolución de las toneladas de carbono por hectárea, para el total de la superficie de cada tipo de cobertura de vegetación significativa para actividades productivas (vegetación agrícola de riego, de temporal) y bosque, pastizal y selva baja, con base en la serie VII de INEGI del año 2018. Estos valores derivan de la cantidad de carbono (Kg de carbono por m^2) y de la superficie total que cubre el tipo de cobertura.

Contribución al almacenamiento de las presas

Dentro del área de influencia del proyecto se encuentran 5 presas, las cuales fueron monitoreadas a lo largo del proceso. Al inicio del proyecto, éstas registraban $4,873.19 \text{ hm}^3$ de almacenamiento. Conforme al avance y a los vuelos de estimulación, el registro fue de $7,576.4 \text{ hm}^3$ almacenados.

Nombre de la presa	NAMO almacenamiento (hm^3)	Inicio de proyecto 3 junio 2024 (hm^3)	Fin del proyecto 31 de agosto 2024 (hm^3)	% de llenado
José María Morelos y Pavón	545.93	516.09	525	96.2
Zicuirán	36.294	13.75	36.9	101.7
Los Olivos	10.262	2.54	10.3	101.0
Infiernillo	7872.59	4088.9	6558.5	83.3
Constitución de Apatzingán	590.025	251.91	445.5	75.5
Total	9,055.1	4,873.1	7,576.4	83.7

Resultados en el almacenamiento de las presas con respecto al NAMO (hm^3) al inicio y al final del proyecto. Es de resaltar que se logró un incremento de 55.47 % en el almacenamiento de las presas, respecto al inicio del proyecto, lo que se traduce en $2,703.3 \text{ hm}^3$, gracias a la precipitación estimulada.



Precipitación La eficiencia registrada para los días de vuelo fue del 100%, es decir, se registró lluvia todas las veces que se voló y se aplicó Rainmate®, en al menos una estación.

Caso	Descripción	Precipitación (mm)		
		Pronóstico acumulado	Acumulado en pluviómetros	Incremento (%)
1	Análisis total	1,442.1	1,827.5	26.7
2	Análisis de nubes estáticas	599.3	926.6	54.6
3	Análisis de nubes dinámicas	698.7	1,077.6	56.2

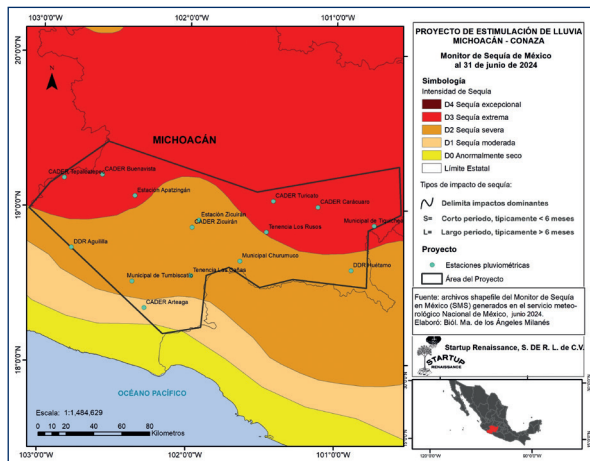
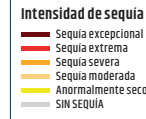
Para la variable precipitación, en la mayoría de estos 15 vuelos el promedio de precipitación fue mayor para el polígono de trabajo o para el área de influencia (área estimulada), respecto a los registros del área externa. En general, las imágenes muestran que las celdas de precipitación están claramente asociadas a las rutas de vuelo o aledañas a estas.



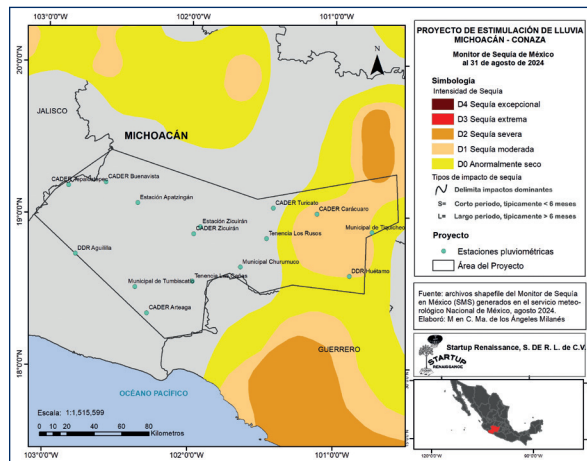
Contribución a la mitigación de la sequía

De acuerdo al monitor de sequía en México (MSM) generado en el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN), del 30 de junio al 31 de agosto en los distintos municipios de Michoacán, el área sin afectación por la sequía aumento de 0 a 62.3% y dentro de cada tipo de categoría evolucionaron 45.3% en D0, 11.5% en D1 y 1.9% en D2. La categoría D3 que implica sequía extrema y la categoría D4 sequía excepcional se lograron eliminar completamente en el polígono de trabajo.

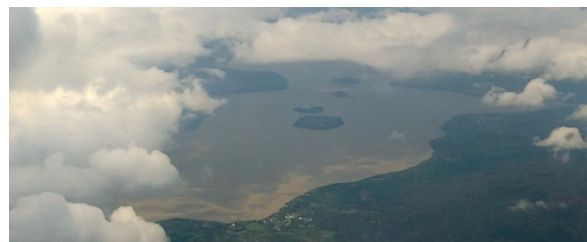
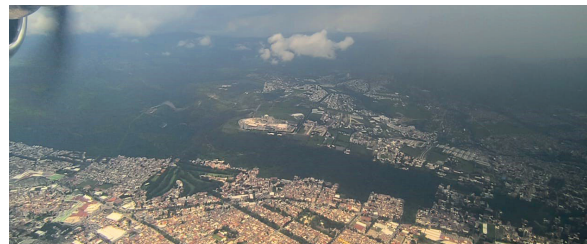
Categoría de sequía	Porcentaje de área (%)					
	SS	D0	D1	D2	D3	D4
Sequía al 30 de junio de 2024	0.0	0.0	0.1	23.5	75.9	0.5
Sequía al 31 de agosto de 2024	62.3	24.3	11.5	1.9	0.0	0.0



Categorías de sequía en el Estado de Michoacán al inicio del proyecto



Categorías de sequía en el Estado de Michoacán después del proyecto



Resultados

El proyecto cumplió con los principales objetivos planteados, al lograr mitigar en gran medida los efectos de la sequía sobre los sectores productivos más sensibles al comportamiento de las lluvias, así como la disponibilidad de agua para uso doméstico de las comunidades. El indicador directo de esto es que se obtuvo un incremento de 26.7 % sobre la precipitación pronosticada en forma natural, llegando hasta 56.2 % en los casos de nubes dinámicas, lo que fue frecuente.

Los sensores remotos nos indican que se lograron incrementos en el verdor de la vegetación dentro del polígono de trabajo durante la aplicación del proyecto, lo que tiene un efecto directo sobre la cobertura vegetal (biomasa) y por lo tanto en la ganadería y en la captura de carbono, principalmente, significando esto un aporte importante para la mitigación de los efectos de la sequía, con un impacto positivo inmediato sobre las actividades productivas.



REGIÓN ANDINA, SUDAMÉRICA

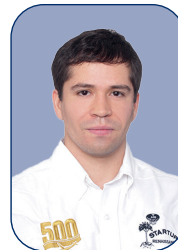
Equipo Coordinador del Proyecto 1



■ Martín Máynez Chavarria
COORDINADOR



■ Víctor Alfonso Torres Sánchez
SUPERVISOR DE VUELOS



■ Luis Daniel Máynez Alcalá
OPERADOR DE REACTIVO

Equipo Coordinador del Proyecto 2 y 3



■ Luis García Saavedra
COORDINADOR



■ Carlos Carbajal Hernández
SUPERVISOR DE VUELOS

Equipo Coordinador del Proyecto 4



■ Luis Rodrigo García Aguilar
COORDINADOR



■ Brian Enrique Ávila Ortega
OPERADOR DE REACTIVO



■ Juan Carlos Díaz Leoadio
OPERADOR DE REACTIVO



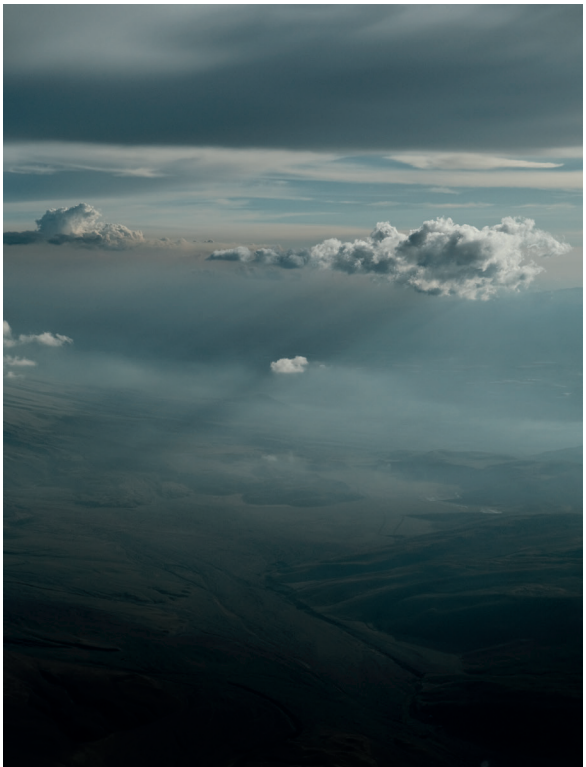
■ María de la Concepción García Aguilar
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

REGIÓN ANDINA, SUDAMÉRICA

Fueron 4 proyectos dentro de la Región Andina, dirigidos a buscar mantener el nivel óptimo de los embalses para una operación hidroeléctrica eficiente. Los proyectos iniciaron el 24 de abril del 2024 y finalizaron el 14 de diciembre del mismo año, completando un acumulado de 100 vuelos de estimulación, con resultados favorables, ya que se logró un incremento del 94.07% sobre lo pronosticado en la época más seca que dura 8.1 meses, del 11 de mayo al 16 de enero; logrando precipitaciones superiores a la media histórica de la zona. El trabajo se realizó en un polígono caracterizado por una orografía principalmente montañosa, con elevaciones que varían desde los 500 m hasta los 6,000 m; y cuyo diseño se ubicó estratégicamente sobre las cuencas que alimentan las principales hidroeléctricas.



Se realizaron 100 vuelos de estimulación.		
Distancia efectiva recorrida dentro del polígono de trabajo	Superficie cubierta dentro del polígono de trabajo	Reactivo Rainmate® aplicado
1,213,710 km	73,320,295.0 ha	10,000 lt
Lámina precipitada acumulada durante los días de vuelo:		
7,251 millones de m³		
Incremento logrado entre lo precipitado contra lo pronosticado los días de vuelo:		
94.07%		



Se realizaron un total de 100 vuelos de estimulación mediante cuatro proyectos, con resultados favorables, logrando un incremento del 94.07% sobre lo pronosticado.

Con el desarrollo de estos cuatro proyectos se cubrió la época más seca, que dura 8.1 meses, logrando superar satisfactoriamente el pronóstico global para la zona de trabajo y alcanzando precipitaciones superiores a la media histórica de la región.

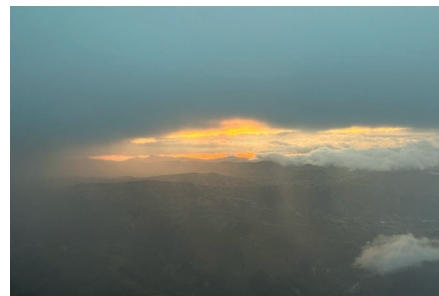
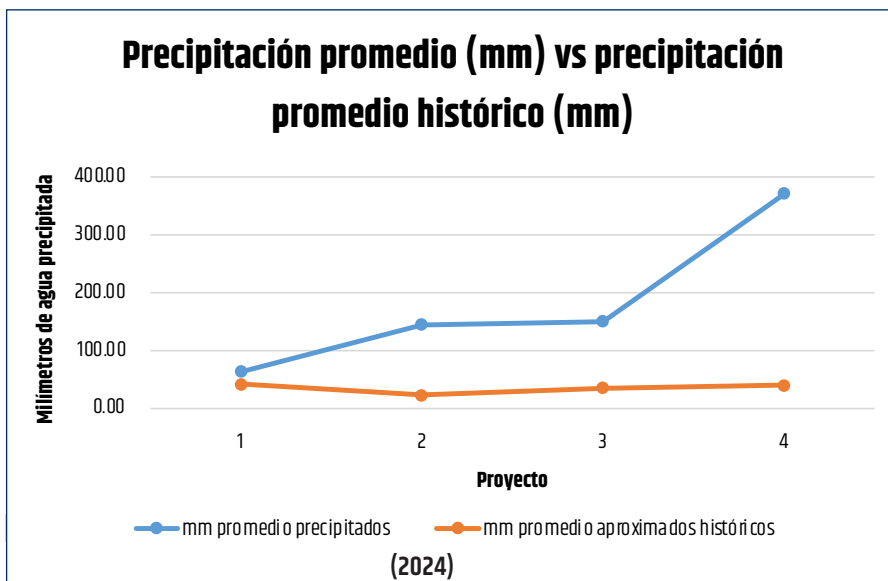


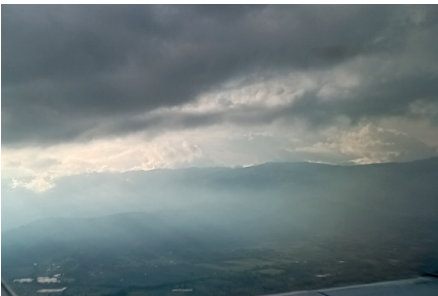
Precipitación

La precipitación registrada en pluviómetros y/o Sensores Remotos para los días de vuelo fue del 100%, es decir, se registró lluvia todas las veces que se voló y se aplicó Rainmate® en al menos una estación.

Caso	Descripción	Precipitación (mm)		
		Pronóstico acumulado	Acumulado en pluviómetros	Incremento (%)
1	Análisis total	7,526.60	14,606.55	94.07
2	Análisis de nubes estáticas	3,301.30	5,537.89	67.75
3	Análisis de nubes dinámicas	3,414.40	6,278.62	83.89

Durante el desarrollo del cuarto proyecto, siempre fue evidente el mayor incremento del NDVI (verdor en vegetación) y la precipitación dentro del polígono de trabajo, en comparación con las áreas fuera de él, como respuesta a la mayor precipitación registrada en el polígono.





■ Resultados

Se logró cumplir con el objetivo de incrementar las precipitaciones en la temporada seca de la región atendida por el proyecto, lo que se demostró con los aumentos de volúmenes en los principales embalses y el mantenimiento de éstos. Este volumen de agua fue sin duda, clave para mitigar los efectos de una temporada de lluvias deficiente, que provocó que los embalses llegaran casi secos al finalizar el período de lluvias, produciendo a su vez serios problemas para la generación eléctrica. Gracias a las operaciones de estimulación, y a la administración eficiente del agua, las plantas generadoras alcanzaron gradualmente los niveles óptimos de operación. ☁





SONORA SONORA



■ Marco Polo
Martínez Mayorquín
COORDINADOR



■ Tania Abigail
Burgos Othón
OPERADORA DE REACTIVO



■ Alejandra
Maldonado Gutiérrez
COORDINADORA DE PLUVIÓMETROS



■ Gustavo
Cumplido Barragán
COORDINADOR DE PLUVIÓMETROS



■ Ángela del Carmen
Ramos Martínez
AUXILIAR EN INFORMÁTICA

SONORA

Este proyecto se realizó en coordinación con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura (SAGARHPA) del estado de Sonora. Su enfoque se dirige tanto a la recarga de cuerpos de agua, como a disminuir los efectos de la sequía en el campo sonorense, auxiliándose en la Estimulación de Lluvias. El polígono de trabajo tiene una superficie de 2,038,431.19 ha, que se ubica estratégicamente en las cuencas del Río Concepción, Río Mayo, Río Mátape, Río Sonora y Río Yaqui (figura 1). Influye en 30 municipios de Sonora y 3 de Chihuahua. Se realizaron 19 vuelos, del 03 de julio al 14 de septiembre, en una aeronave modelo Twin Commander 690C, propiedad del Gobierno del Estado de Sonora.

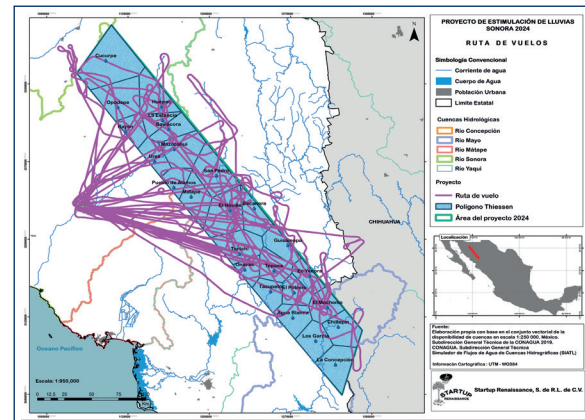


Figura 1. Mapa de localización del proyecto con las trayectorias de los vuelos.

Se realizaron 19 vuelos de estimulación.

Distancia efectiva recorrida dentro del polígono de trabajo	Superficie cubierta dentro del polígono de trabajo	Reactivo Rainmate® aplicado
6,241 km	187,230 km²	1,900 lt

Lámina precipitada acumulada durante los días de vuelo:
2,684 millones de m³

Incremento logrado de precipitación, sobre lo pronosticado los días de vuelo:
89.76%

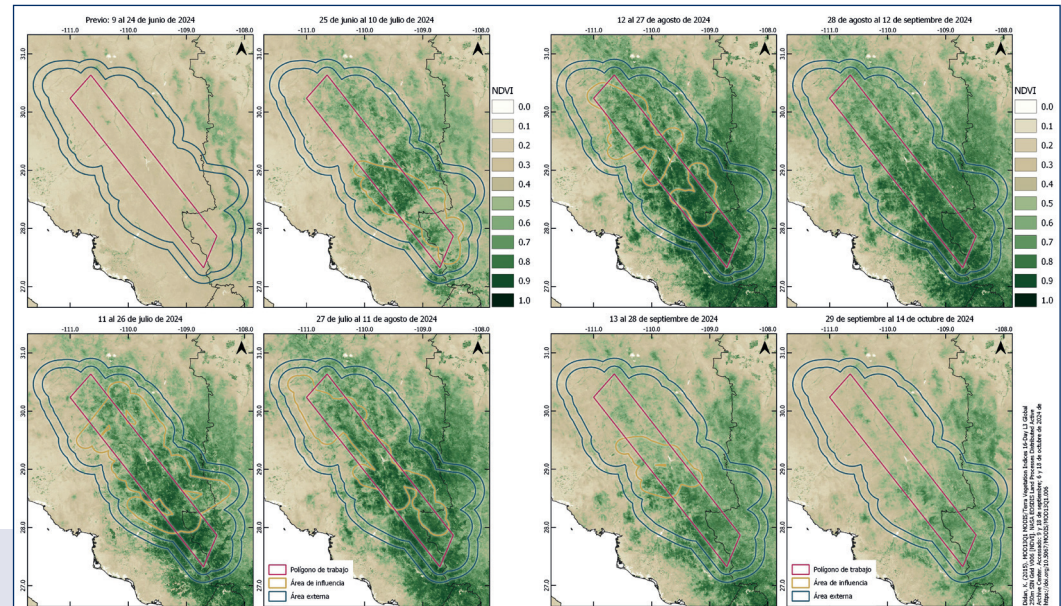


Sensores remotos / Índice de verdor (NDVI)

Para las variables NDVI o índice de vegetación y fotosíntesis, los sensores remotos indican incremento en el verdor de la vegetación y el aumento de la biomasa mediante la medición del carbono, con base en la actividad de fotosíntesis.

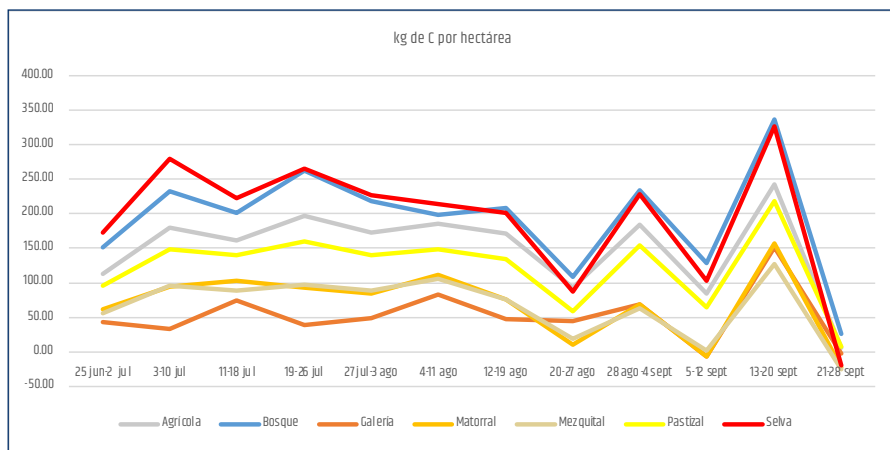
Para el NDVI los registros y el promedio muestran una tendencia positiva y siempre mayor para el polígono de trabajo y del área de influencia, respecto a los valores del área externa con las que se comparan. Se observa una clara progresión positiva del valor del NDVI, con un pico en el valor promedio hacia la mitad del periodo de estimulación. Otro aspecto a resaltar es este valor de la zona estimulada (área de influencia) es mucho mayor que en las otras dos áreas, y que el valor promedio del polígono de trabajo (polígono rosa) y del área externa (polígono azul) que fueron casi iguales al principio, con la estimulación se observó un aumento significativo en el valor promedio del NDVI para el polígono de trabajo. También aquí resulta claro ver la marcada disminución en estos parámetros a partir del 27 de agosto y una vez concluidos los vuelos, y por lo tanto también la disminución de precipitaciones.

Figura 2. Imágenes del Índice de vegetación (NDVI) en el periodo previo, durante y posterior a la estimulación.



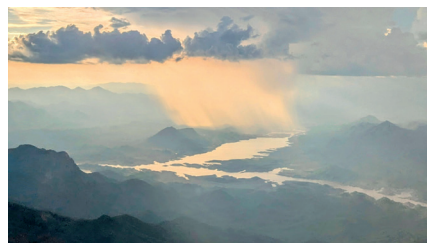
Contribución en la cobertura vegetal

Dentro del polígono de trabajo se registran siete tipos de vegetación, siendo la selva baja la de mayor superficie, seguida por el matorral y el bosque. Con base en estos tipos de vegetación se analiza la fotosíntesis neta (kg C/m^2), que se utiliza como base para calcular la cantidad de kg de carbono por hectárea. Los tipos de vegetación responden más o menos de manera similar, según se desarrollan los vuelos de estimulación. La selva y el bosque, seguido por lo agrícola y el pastizal son los que presentan los promedios de kg de C por ha más altos. La conversión de fotosíntesis neta a carbono total indica que la selva baja (por su extensión) es la que acumula más carbono, seguida por el bosque y la vegetación agrícola de temporal.



Precipitación

La precipitación registrada en pluviómetros y/o Sensores Remotos para los días de vuelo fue del 100%, es decir, se registró lluvia todas las veces que se voló y se aplicó Rainmate®, en al menos un sitio.

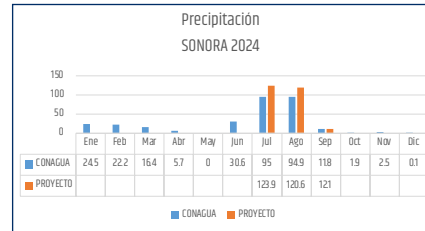


Caso	Descripción	Precipitación (mm)		
		Pronóstico acumulado	Acumulado en pluviómetros	Incremento (%)
1	Análisis total	1,763.20	3,345.95	89.76
2	Análisis de nubes estáticas	473.01	706.54	49.37
3	Análisis de nubes dinámicas	557.00	1,268.80	127.79

El análisis global de la precipitación por sensores remotos, en 15 de los 19 vuelos realizados, el promedio de precipitación fue mayor para el polígono de trabajo o para el área de influencia (área estimulada), respecto a los registros del área externa las imágenes muestran que las celdas de precipitación con valores altos están frecuentemente asociadas a las rutas de vuelo o contiguas a éstas.

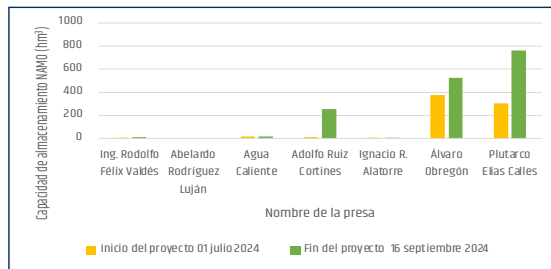


En comparación con los datos publicados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para el estado de Sonora, los meses en que se ejecutó el proyecto se superó el promedio un 30.4 % en el mes de julio, un 27.21 % el mes de agosto y en un 2.5 % en septiembre, esto dentro del polígono de trabajo.

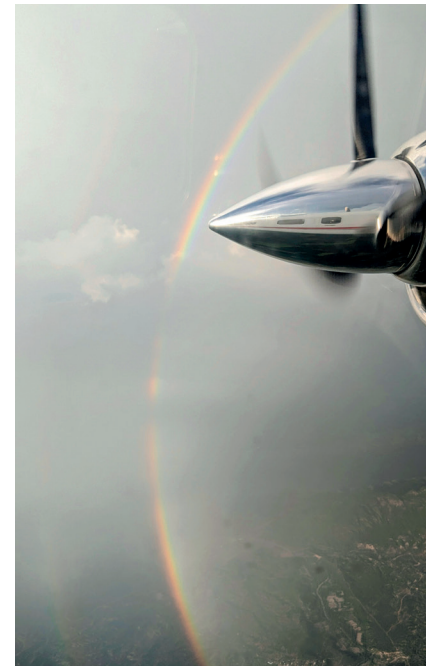


■ Contribución al llenado de presas

Son 7 las presas dentro del área de influencia del proyecto, con una capacidad de almacenamiento de 7,450.67 hm³ de agua, que en su mayoría son destinadas a riego. Al final de la ejecución del proyecto, al 16 de septiembre, las presas dentro del área de influencia registraron en total 1,571.16 hm³.



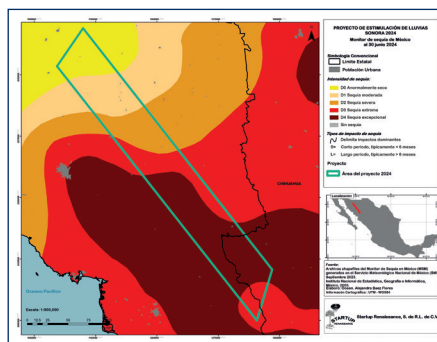
Es importante resaltar que estas presas estuvieron realizando descargas variables, dependiendo de las necesidades de los distritos a atender; por lo que los ingresos reales de agua a las mismas no están considerados en el presente reporte y sin duda son valores altos con relación a los volúmenes almacenados al finalizar el proyecto.



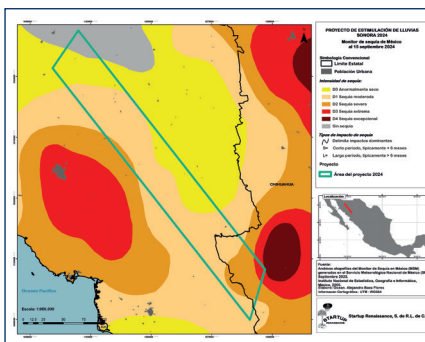
■ Contribución a la mitigación de la sequía

Los mapas nacionales publicados por el Monitor de la Sequía en México, muestran que para el final del proyecto (se tomaron los datos del 15 de septiembre de 2024) la sequía disminuyó en el estado, lo que sin duda es más acentuado en el polígono de trabajo.

	Porcentaje de área de sequía						Intensidad de sequía
	SS	D0	D1	D2	D3	D4	
Sequía al 30 de junio de 2024	21.9	18.1	11.5	13.1	17.2	18.2	<ul style="list-style-type: none"> Sequía excepcional Sequía extrema Sequía severa Sequía moderada Anormalmente seco SIN SEQUIA
Sequía al 15 de septiembre de 2024	15.0	42.4	24.9	11.5	6.2	0	



Categorías de sequía en el Estado de Sonora al inicio del proyecto



Categorías de sequía en el Estado de Sonora después del proyecto

■ Resultados

El proyecto cumplió con los principales objetivos planteados, al lograr mitigar en gran medida los efectos de la sequía sobre los sectores productivos más sensibles al comportamiento de las lluvias, y el indicador directo de esto es que se obtuvo un 89.76 % de lluvia por arriba de los pronósticos.

Los sensores remotos nos indican que se lograron incrementos muy significativos en el verdor de la vegetación dentro del polígono de trabajo, durante la aplicación del proyecto. Lo que tiene un efecto directo sobre la productividad y la cobertura vegetal, y por lo tanto para la ganadería y captura de carbono, significando esto una aportación importante para la mitigación de los efectos de la sequía. Esto es sin duda motivo de gran satisfacción por lo que representa para los productores.

EQUIPO CENTRAL STARTUP RENAISSANCE

EQUIPO DE ANÁLISIS TÉCNICO



■ Joaquín
Contreras Gil
COORDINADOR



■ Alejandra
Baez Flores
ANALISTA



■ Samantha
Rodríguez de la Gala Hernández
ANALISTA



■ María de los Ángeles
Milanés Salinas
ANALISTA



■ Bertha
García Capitanachi
ANALISTA

EQUIPO DE ANÁLISIS ESPECTRALES, SUELO Y VEGETACIÓN



■ Bernardino Ricardo
Eaton González
COORDINADOR TÉCNICO



■ Nadia Fernanda
Siordia González
ANALISTA ESPECIALIZADA



■ Jessica
Martínez Jiménez
COORDINADORA DE
METEOROLOGÍA



■ Carolina
Dougnac Valdivia
METEORÓLOGA



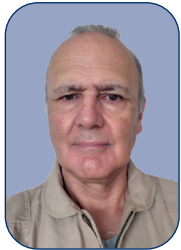
■ Víctor Alfonso
Torres Sánchez
COORDINADOR

EQUIPO METEOROLÓGICO

CAPACITACIÓN A PERSONAL DE VUELOS

EQUIPO AÉREO PARTICIPANTE

CHILE



■ Óscar
Aranda Mora
CAPITÁN



■ Daniel
Boisset Encina
CAPITÁN



■ Alex
Cortés Flores
APOYO TÉCNICO

MICHOACÁN



■ Daniel
Sierra Poucel
CAPITÁN



■ Hugo
Esnaurrizar Pascasio
CAPITÁN

LA HUASTECA



■ Pablo
Alba García
PILOTO



■ Juan Manuel
Cano Angulo
PILOTO



■ Ricardo Abraham
Sánchez Coss
PILOTO



■ Carlos Luis
Ayala Espinoza
PILOTO



■ Daniel
Sierra Poucel
PILOTO

EQUIPO AÉREO PARTICIPANTE

SONORA



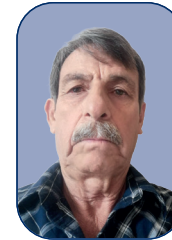
■ **Roberto
Andere García**
DIRECTOR DE HANGAR



■ **Alejandro
Jáuregui Rentería**
PILOTO



■ **Bernardino
Abril López**
COORDINADOR DE
HANGAR



■ **Héctor Ramón
Aguirre Carranza**
PILOTO



■ **Juan Pablo
Valenzuela Martínez**
PILOTO



■ **Leonardo
Cobarrubias Vázquez**
AYUDANTE GENERAL



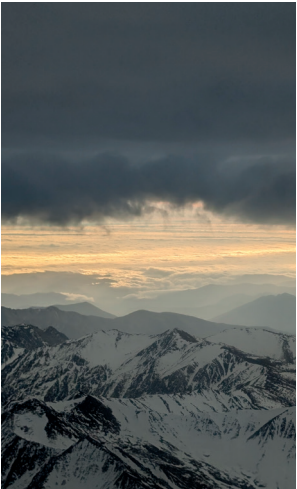
■ **Jaime
Luna Virgen**
MECÁNICO
AERONÁUTICO

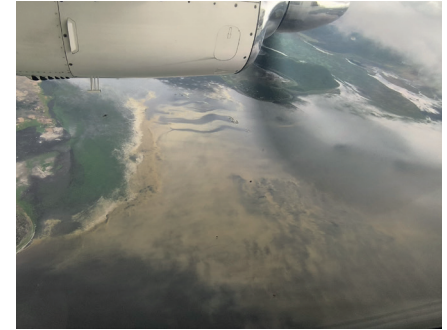


■ **José Israel
Favela Aldana**
MECÁNICO
AERONÁUTICO



■ **Sergio Adrián
López Cortés**
PILOTO





LA EXCELENCIA EN EL SEMBRADO DE NUBES

En **Startup Renaissance** nos sentimos muy orgullosos de nuestro trabajo y de haber sido distinguidos con el AGRINEXT AWARD 2024, otorgado en la ciudad de Dubái a "LA EXCELENCIA EN EL SEMBRADO DE NUBES"; cerrando así otro año de operaciones exitosas en la Estimulación de Lluvias.

Este reconocimiento nos impulsa aún más en nuestro compromiso con la sociedad y el medio ambiente, de seguir llevando agua en forma responsable a donde más se necesite. ☁️



Agradecimientos



■ Alejandro Trueba

2024 fue un año de retos e incertidumbre para nuestro proyecto; además concluían las funciones de la Administración Federal en turno, que había absorbido el pago de nuestras operaciones en distintos estados de la República durante los primeros 3 años. Afortunadamente, a falta de esa subvención distintos clientes decidieron seguir pagando los servicios por su cuenta; creándose una inercia que nos llevaría al ámbito internacional.

En una cruzada contra la sequía, gobiernos como el de Michoacán o Sonora nos reiteraron su confianza para continuar con la Estimulación de Lluvias; sectores privados como el Grupo Pantaleón y dos países hermanos, entre ellos Chile, se abrieron a la oportunidad de aplicar nuestra tecnología en sus territorios. El profesionalismo y los buenos resultados fueron el sustento para que en noviembre, en la ciudad de Dubái, recibiéramos la distinción de “Excelencia en Siembra de Nubes”, auspiciada por AgriNext. A todos ellos, que tuvieron fe en nosotros durante el 2024 y nos estimularon con su confianza, va nuestro más profundo agradecimiento.

Sin embargo la sequía continuó amenazante, y hubo entidades que ya sin el apoyo federal decidieron no implementar en 2024 la estrategia de estimulación, esperando que la propia naturaleza trajese temporales suficientes de lluvia, algo que no sucedió; reportándose sobre ellas terribles secas e impactos graves en la producción de cultivos y alimentos, abastecimiento de agua y en servicios sustentados en la disponibilidad del vital líquido. En Startup Renaissance estamos seguros que tales situaciones se podrían haber minimizado o atemperado con nuestra participación.

A 4 años cumplidos y 566 vuelos realizados -todos exitosos- fortalecemos nuestra convicción de que, hoy por hoy, la mejor opción para mitigar el cada vez más frecuente fenómeno de la sequía, es nuestro proyecto de Estimulación de Lluvias; debido a su bajo costo por unidad de superficie beneficiada e incrementos en la disponibilidad de lluvia efectiva, la respuesta de la vegetación y la productividad al estímulo y la mayor disponibilidad de agua en los embalses; ya lo hemos comprobado. Hoy podemos afirmar que contamos con un amplio dominio de la tecnología de Estimulación de Lluvias, bajo cada vez más disímolas circunstancias y objetivos operativos.

Reitero nuestro agradecimiento a aquellas personas, organizaciones y gobiernos estatales y nacionales, incluido el de México, que pusieron su confianza en nosotros y nuestra tecnología; a quienes pudimos corresponder con compromiso, eficacia y fundamentalmente con resultados. ☁️



El arte de transformar lo imposible en realidad

Los Andes, lluvia y nieve en el norte de Chile