

Programa de Sembrado de Nubes  
para Mejorar la Producción de Energía Hidroeléctrica  
en el Área Colectora El Cajón, Honduras

por

Don A. Griffith, Mark E. Solak  
TRC North American Weather Consultants  
Salt Lake City, Utah, U.S.A.

y

José Moncada  
Empresa Nacional de Energía Eléctrica  
Tegucigalpa, Honduras, C.A.

TRC North American Weather Consultants (TRC NAWC) firmó contrato con Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) para dirigir programas de sembrado de nubes en Honduras. Dichos programas se llevaron a cabo en los embalses El Cajón y Lago Yojoa durante parte de las estaciones de lluvias de 1993, 1994, 1995 y 1997. El objetivo de estos programas consistió en aumentar las precipitaciones naturales en estas áreas, lo cual a su vez incrementó la cantidad del caudal afluente hacia el Embalse El Cajón. Así, se pudo disponer de más agua para generar energía hidroeléctrica.

Las evaluaciones de los programas de sembrado de nubes de 1993, 1994 y 1995 indicaron un 9 a 15 por ciento de aumento en las precipitaciones. En el caso del programa de Junio a Octubre de 1995, el aumento fue del 13 por ciento. Con el fin de evaluar la afluencia adicional hacia el Embalse El Cajón por acción del programa de sembrado de nubes de 1995, se estimó un caudal de 366.876.000 m<sup>3</sup>.

En base a ciertas suposiciones se calcularon los costos del programa versus el valor del caudal afluente según el programa de 1995. La relación costo/beneficio resultante fue de 23,5/1.

## **1.0 INTRODUCCIÓN**

Algunos países de América Central dependen estrechamente de centrales hidroeléctricas para generar energía. En la mayoría éstos, la producción hidroeléctrica comprende la parte principal y, en algunos casos, un parte importante del consumo de energía. En el curso de la estación lluviosa de 1991 y durante casi toda la estación lluviosa de 1992 y 1993, hubo sequía en la mayoría de los países de América Central. Esta sequía podría estar relacionada con el fenómeno climático de El Niño e impactó en forma significativa en las reservas de agua y, consecuentemente, en la producción de energía hidroeléctrica.

Así fue que TRC North American Weather Consultants (TRC NAWC) fue llamada por la Empresa Eléctrica y el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) en el otoño de 1991 para determinar la posibilidad de aplicar la tecnología de sembrado de nubes a fin de disminuir algunos de los impactos de la sequía en el Embalse Chixoy de Guatemala. Así, se llevó a cabo un breve programa de sembrado de nubes en el otoño de 1991 y otro más extenso en el verano 1992. Como las lluvias volvieron a Guatemala en el verano de 1993, no fue necesario realizar ningún programa entonces. En cambio, en 1994 se realizó un programa de emergencia. El aumento estimado de las precipitaciones por el programa de 1992 ejecutado en el Embalse Chixoy fue del 17 por ciento. Los funcionarios de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) de Honduras expresaron su interés en el programa que se estaba realizando en Guatemala, y por ello se diseñó y ejecutó un programa en el Embalse El Cajón, en Honduras, durante tres meses en el verano de 1993. Gracias al evidente éxito de este programa, se ejecutaron otros similares en las estaciones lluviosas de 1994, 1995 y 1997. El resto del presente documento describe los programas que se realizaron en Honduras.

## **2.0 DISEÑO DEL PROGRAMA PARA HONDURAS**

La forma principal de sembrado para este programa consistió en el empleo de un avión Cessna 340A de presión, dos motores, equipado con instrumentos de navegación GPS. Se utilizaron tanto generadores de acetona-yoduro de plata como portabengalas de yoduro de plata por goteo, los cuales pueden observarse en la Figuras 1 y 2 de la página siguiente. Los portabengalas se emplearon con el objeto de lograr un respuesta dinámica en el sembrado de nubes cumulus, conforme al diseño del Florida Area Cumulus Experiment (FACE) (Simpson, 1980) y más recientemente del Southwest Cooperative Program y Texas Experiment, para así aumentar las (Woodley, et al., 1996). TRC NAWC ha aplicado este enfoque al ejecutar otros programas de sembrado de nubes en verano (Griffith y Brown, 1976; Griffith, 1982; Griffith, 1987) (Solak, et al., 1994) y (Griffith, et al., 1995). Los portabengalas de yoduro de plata se dejaron caer en nubes cumulus apiladas, alcanzando un nivel de  $-5^{\circ}\text{C}$  (5,5 km, aproximadamente) mediante este procedimiento. A su vez, los generadores de acetona-yoduro de plata se emplearon en formaciones más estratificadas de nubes, con el objeto de lograr una respuesta de sembrado estática. También se utilizaron en este programa varios generadores terrestres de yoduro de plata. Las operaciones de sembrado aéreo de nubes se realizaron de día solamente. Por su parte, los generadores terrestres se utilizaron tanto de día como de noche.



**Figura 1 Portabengalas de Yoduro de Plata por Goteo**



**Figura 2 Generador de Acetona-Yoduro de Plata y Portabengalas de Yoduro de Plata por Goteo**

Como centro de las operaciones del programa se utilizó un radar meteorológico dedicado de 5 cm. El radar y el avión operaban desde San Pedro Sula en apoyo al programa del Embalse El Cajón (Figura 3). En las primeras dos estaciones del programa la información del tiempo fue suministrada por la oficina de TRC NAWC en Salt Lake City, Utah, EE.UU., mediante computadora y modem. En 1994 se agregó una tecnología que permitía obtener fotografías de satélites meteorológicos en tiempo casi real para toda la zona de América Central y el Caribe. Asimismo, en 1997 el programa pudo contar con una computadora personal para tener acceso a Internet y disponer de una variedad de productos meteorológicos.



**Figura 3 Embalse El Cajón, Honduras**

### 3.0 OPERACIONES

Los cuatro programas de Honduras se ejecutaron del 24 de Agosto al 23 de Noviembre de 1993; 24 de Junio al 11 de Noviembre de 1994; 1° de Junio al 28 de Octubre de 1995, y 25 de Agosto al 31 de Octubre de 1997. En las Tablas 1 a 3 se resume la actividad de sembrado de las primeras tres estaciones de operaciones. En las dos primeras estaciones, el sembrado se realizó principalmente en la parte norte del Embalse El Cajón. A su vez, las oportunidades de sembrado en 1995 se extendieron por toda la zona del embalse. Como el avión de sembrado operaba desde San Pedro Sula y las áreas colectoras estaban ubicadas en la parte noroeste de la cuenca hidrográfica, naturalmente se tendía a sembrar nubes en el norte del embalse.

**Tabla 1**

#### **Resumen Mensual de Sembrado, 1993**

<b>Mes</b>	<b>Días de Sembrado</b>	<b>Sembrado Aéreo (días)</b>	<b>Sembrado Aéreo (horas)</b>	<b>Sembrado Terrestre (días)</b>	<b>Sembrado Terrestre (horas)</b>
Septiembre	13	9	11,5	10	56,0
Octubre	17	8	15,0	16	162,5

**Tabla 2**

#### **Resumen Mensual de Sembrado, 1994**

<b>Mes</b>	<b>Días de Sembrado</b>	<b>Sembrado Aéreo (días)</b>	<b>Sembrado Aéreo (horas)</b>	<b>Sembrado Terrestre (días)</b>	<b>Sembrado Terrestre (horas)</b>
Junio	1	1	1,8	1	9
Julio	12	9	23,3	9	97,1
Agosto	18	14	35,8	13	135,7
Septiembre	18	14	23,5	13	144,0
Octubre	15	10	10,1	9	34,9
Noviembre	7	5	7,7	5	22,5

**Tabla 3**

**Resumen Mensual de Sembrado, 1995**

<b>Mes</b>	<b>Días de Sembrado</b>	<b>Sembrado Aéreo (días)</b>	<b>Sembrado Aéreo (horas)</b>	<b>Sembrado Terrestre (horas)</b>	<b>Sembrado Terrestre (horas)</b>
Junio	20	13	27,9	18	694
Julio	23	9	20,8	27	998
Agosto	30	13	30,5	29	1213
Septiembre	24	10	23,0	20	494
Octubre	14	8	22,3	15	195

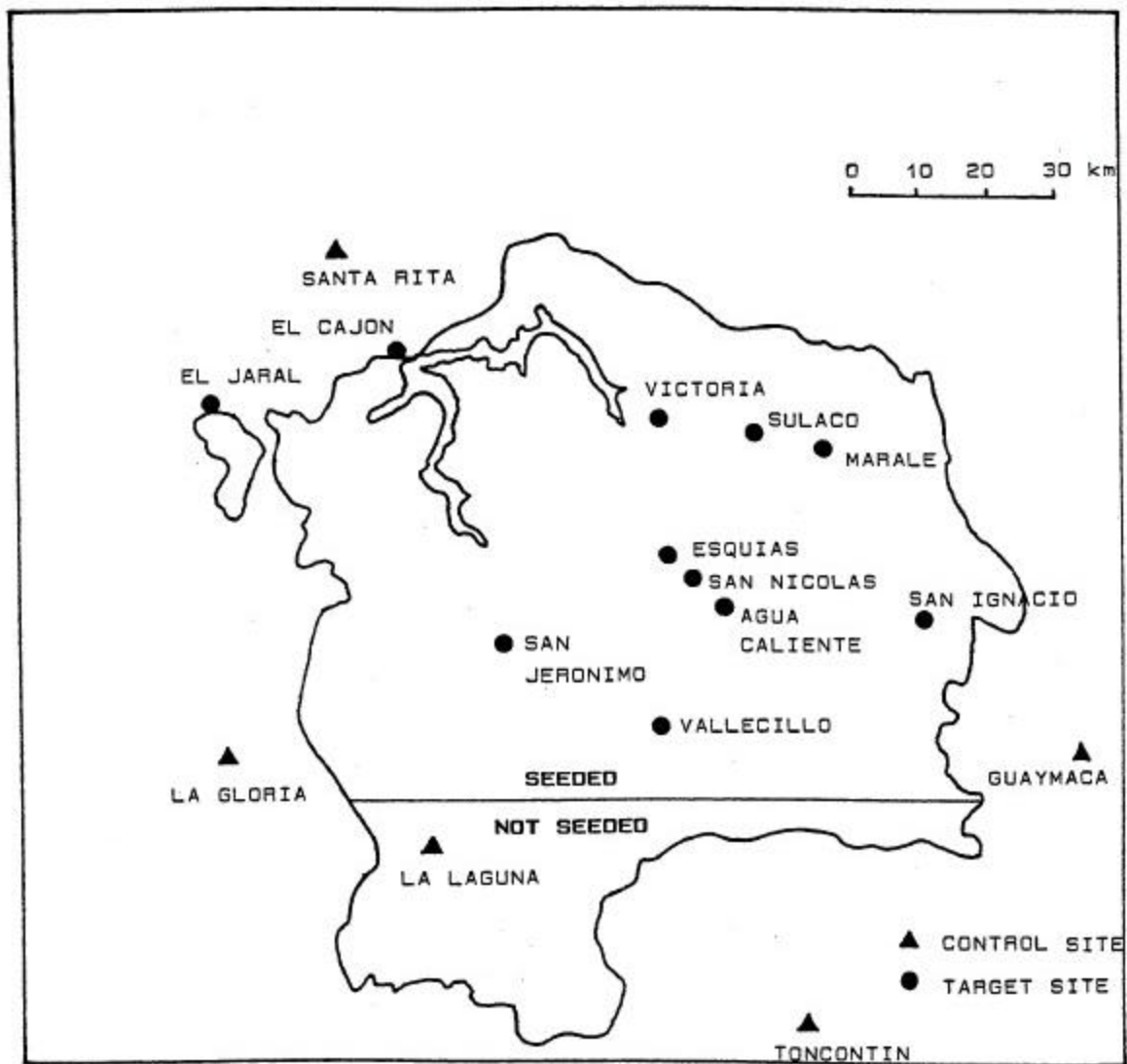
**4.0 RESULTADOS**

Para investigar los resultados de los programas de sembrado de nubes se utilizó una técnica de evaluación de objetivo/control. Mediante la misma es posible recolectar datos de las precipitaciones en las áreas objetivo y cercanas. Tales datos se obtienen a partir de un período histórico anterior a cualquier sembrado de nubes. Entonces, se realiza un ecuación de regresión lineal que relaciona las precipitaciones de las áreas objetivo y de las “áreas de control”.

El personal de ENEE proporcionó datos de precipitaciones mensuales en el Embalse El Cajón y los lugares circundantes. Tales juegos de datos abarcaban del año 1974 a 1992. A partir de los mismos se realizaron diferentes ecuaciones de regresión que cubrían distintos períodos (por ej., Julio—Septiembre, Agosto—Septiembre) y se utilizaron diferentes estaciones como “control”. En las primeras dos estaciones de sembrado, la mayoría de las actividades de sembrado se hicieron en la mitad norte del área objetivo. En 1995, las operaciones alcanzaron a cubrir aproximadamente las tres cuartas partes de la zona norte del embalse. En la Figura 4 se pueden apreciar las estaciones de precipitaciones evaluadas en 1995.

Se utilizaron ecuaciones de regresión a partir de períodos históricos para predecir la cantidad de precipitaciones naturales que se hubieran producido en el área objetivo durante las estaciones de sembrado. Luego, tal cantidad se comparó con la actual para determinar si habían diferencias. Dichas comparaciones se hicieron dividiendo el promedio de precipitaciones observadas en el área objetivo por las precipitaciones pronosticadas.

(mapa)



(La línea horizontal que cruza el Embalse el Cajón separa aproximadamente las áreas sembradas de las no sembradas).

**Figura 4 Lugares de las mediciones de precipitaciones objetivo y de control realizadas en la evaluación de 1995.**

En la Tabla 4 se indican los resultados de las evaluaciones hechas a las estaciones de sembrado en 1993, 1994 y 1995. Los aumentos calculados van del 9 al 15 por ciento y la diferencia en las precipitaciones promedio es de 57 a 158 mm. Estos resultados son similares a los de otros programas realizados por TRC NAWC en otras zonas.

**Tabla 4**

**Resultados de Evaluaciones Objetivo y de Control**

<b>Período</b>	<b>(1) Ecuación de Regresión</b>	<b>Coefficiente de Correlación</b>	<b>(2) Sembrado Pronosticado</b>	<b>Diferencia entre Sembrado y Pronóstico (mm)</b>
Septiembre - Octubre, 1993	$yc = 143,75 + 0,75(x)$	0,83	1,15	57
Julio - Octubre, 1994	$yc = 656,11 + 0,75(x)$	0,82	1,09	91
Junio - Octubre, 1995	$yc = 552,9 + 0,75(x)$	0,73	1,13	158

Notas: (1) Donde:  $yc$  = precipitaciones promedio calculadas del área objetivo.

$x$  = precipitaciones promedio del área de control

(2) Donde: Sembrado significa las verdaderas precipitaciones promedio del área objetivo. Pronóstico significa precipitaciones promedio pronosticadas del área objetivo a partir de la ecuación de regresión.

Un análisis hipotético de la posible relación costo/beneficio de este programa puede proporcionar información interesante. El 13 por ciento de aumento en las precipitaciones durante 1995 fue equivalente a 158 mm más de lluvias distribuidos en las tres cuartas partes del Embalse El Cajón, cuya superficie es de 6.450 km<sup>2</sup> aproximadamente. Se calcula un 36 por ciento de eficacia entre precipitaciones y afluencia en el Embalse El Cajón durante el período de Junio a Octubre:

$$6.450 \text{ km}^2 \times 10^6 \text{ m}^2 \times \frac{158 \text{ mm}}{1000 \text{ mm/m}} \times 0,36 = 366.876.000 \text{ m}^3$$

Según los cálculos de ENEE, esta cantidad adicional de agua produciría aproximadamente 124.644.120 kilowatts/hora de electricidad a un valor de US\$0,07541/kwh o equivaldría a un valor bruto de US\$9.400.009. Si se divide este valor por el costo del programa se obtiene una relación de costo/beneficio de 23,5/1.



## 5.0 CONCLUSIONES

Son varias las posibles ventajas que permite el sembrado de nubes para aumentar la producción hidroeléctrica en América Central, tales como:

- Relaciones costo/beneficio típicas que van de 10/1 a 20/1.
- No se requieren mejoras adicionales.
- Los programas de sembrado de nubes se pueden iniciar y parar rápidamente sin compromisos a largo plazo.
- Normalmente se obtienen beneficios adicionales en términos de mayor suministro de agua para los usuarios.
- El agua para producir energía eléctrica se puede volver a utilizar y dicha energía también resulta menos cara que la térmica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Griffith, D.A., J. Girdzus y A.D. Lisonbee, 1995: Programa de Urgencia para el Sembrado de Nubes en el Embalse Chixoy, Guatemala, durante Septiembre y Octubre de 1994. Informe N° WM95.2 de TRC NAWC al Instituto Nacional de Electrificación de Guatemala.

Griffith, D.A., 1987; Tres Programas de Aumento de Lluvias en Texas. Wea. Mod. Association, Journal of Weather Modification, Vol. 14, N° 1, pp. 43-46.

Griffith, D.A. and K.J. Brown, 1976: Programa Operativo contra la Sequía en Jamaica. Wea. Mod. Association, Journal of Weather Modification, Vol. 8, N° 1, pp. 115-125.

Simpson, J., 1980: Corrientes dDescendentes como Enlace en Efectos Dinámicos de Sembrado de Cumulus. Journal of Applied Meteorology, Vol. 19, pp. 477-487.

Solak, M.E., G.M. Wilkerson, D.A. Rish, A.D. Lisonbee y D.A. Griffith, 1994: Operaciones e Investigaciones Aéreas y Terrestres de Sembrado de Nubes en Taiwán, Mayo a Julio de 1994. Informe N° 94-8 de TRC NAWC al Central Weather Bureau de Taiwán.

Woodley, W.L. y D. Rosenfeld, 1996: Prueba de Conceptos de Sembrado de Nubes en Frío en Texas y Tailandia, Parte I. Resultados en Texas hasta la fecha. XIII Conferencia AMS sobre Modificaciones Meteorológicas Planificadas e Inadvertidas, 28 de Enero al 2 de Febrero de 1996, Atlanta, GA., pp 80-67.