

CEER-X-190

ESTUDIOS SOBRE ENERGIA OCEANICA EN PUERTO RICO

Juan A. Bonnet, Jr. - Donald S. Sasscer
Modesto Iriarte



CENTER FOR ENERGY AND ENVIRONMENT RESEARCH
UNIVERSITY OF PUERTO RICO — U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

ESTUDIOS SOBRE ENERGIA OCEANICA EN PUERTO RICO

Juan A. Bonnet, Jr. - Donald S. Sasscer
Modesto Iriarte

Centro para Estudios Energéticos y Ambientales
Universidad de Puerto Rico
abril 1984

ESTUDIOS SOBRE ENERGIA OCEANICA EN PUERTO RICO

Juan A. Bonnet, Jr. - Donald S. Sasscer
Modesto Iriarte

Centro para Estudios Energéticos y Ambientales
Universidad de Puerto Rico

RESUMEN

Los océanos constituyen una fuente inagotable de energía cuyas grandes potencialidades se mantienen todavía virtualmente inexploradas. En este artículo se introduce el concepto de la conversión de la energía térmica del océano (CETO) junto a las otras formas de utilizar la energía solar, en términos de su fundamento, que queda regido por la segunda ley de termodinámica. Se analiza la eficiencia generativa de la máquina CETO y sus consecuencias prácticas.

Se discuten y comparan distintas modalidades para la instalación de las centrales CETO de ciclo cerrado como introducción al importante tema de la potencialidad térmica del océano. Aquí se presenta a la isla de Puerto Rico con magníficas localidades donde ubicar centrales CETO. Se presentan los resultados de estudios oceanográficos, crecimiento bacteriano, prevención y limpieza de películas bacterianas, y evaluación de materiales.

Luego de analizar las condiciones técnicas y ambientales que influyen el desarrollo de las centrales océano-térmicas, el artículo concluye que para principios de la próxima década los costos de producción de energía eléctrica por centrales océano-térmicas en Puerto Rico compararían favorablemente con los de aquellas movidas por carbón y serían sólo una cuarta parte de los costos de generación atribuibles a las plantas termoeléctricas que usan petróleo.

Se afirma, finalmente, que la energía océano-térmica ofrece una de las mejores alternativas para lograr la independencia energética de los países del Hemisferio Americano y exhorta a éstos a colaborar para un rápido desarrollo de esta tecnología.

ESTUDIOS SOBRE ENERGIA OCEANICA EN PUERTO RICO

Juan A. Bonnet, Jr. - Donald S. Sasscer
Modesto Iriarte

Centro para Estudios Energéticos y Ambientales
Universidad de Puerto Rico

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

En el sistema astral al cual pertenece el planeta Tierra, el sol es la principal fuente de energía. En nuestra biosfera no estamos aprovechando a cabalidad la energía que nos suministra la radiación del sol. La naturaleza aprovecha esta energía por medio de la fotosíntesis para energizar la acción vital y liberar el oxígeno necesario para la subsistencia. Además, la energía del sol se almacena en diferentes lugares del planeta, incluyendo los océanos. La energía solar ocasiona las corrientes tanto de agua como de aire, dando lugar a los movimientos de los océanos y a los vientos que mantienen niveles de temperatura adecuados para sostener el ciclo de vida. Hasta ahora ha sido muy difícil desarrollar técnicas para concentrar los rayos solares que llegan difusos a la superficie de la Tierra y aprovecharlos efectivamente como fuente de energía.

Durante la última década, debido a los crecientes aumentos en el precio del petróleo, que es el combustible principal para producir energía, se han venido realizando esfuerzos significativos para utilizar los rayos solares como fuente de energía. Estos intentos incluyen, entre otros: la utilización de los vientos o energía eólica, de las olas del mar, de los cambios en las mareas o nivel del mar; la concentración de los rayos solares para calentar agua u otros líquidos para producir agua caliente o vapor; y la utilización de la biomasa o vegetación como fuente de energía.

Entre las diversas posibilidades, se ha considerado el aprovechamiento de la diferencia de temperatura entre la superficie y las profundidades del mar, proceso que se conoce como conversión de la energía térmica del océano (CETO). Esta alternativa la sugirió y probó por vez primera el francés Georges Claude en las costas de Cuba en el año 1929 (Claude, 1930:1039-44).

Ensayando con una diferencia en temperatura de tan sólo 14°C el doctor Claude, miembro de la Academia de Ciencias de Francia, llegó a producir energía eléctrica a una potencia de 22 kilovatios, suficiente para mover un motor de prueba. La naturaleza, sin embargo, lo venció cuando un huracán rompió la tubería que conducía el agua fría. Desde entonces no volvió a considerarse esta alternativa seriamente y no fue hasta la década pasada que se reanudó su investigación y desarrollo (Dugger et al., 1983).

Básicamente, la idea de cómo extraer esta energía se explica por el principio de Carnot que rige el funcionamiento de los termomotores, donde se aprovecha una diferencia de temperatura para producir energía mecánica. Los rayos solares, al penetrar los primeros metros de la superficie del mar, transfieren su energía al mar. Esto causa que entre el Trópico de Capricornio y el Trópico de Cáncer la temperatura de la superficie del mar sea del orden de 26 a 29 grados Celsius. Estos rayos, sin embargo, son absorbidos en los primeros metros de la superficie y no penetran hasta las profundidades del mar. Por lo tanto, a mayor profundidad, más baja es la temperatura. Entre los 30 y 700 metros de profundidad existe un área llamada termoclina, donde la temperatura del mar se reduce a una mayor razón que en cualquier otra región. A los 1.000 metros de profundidad aproximadamente, la temperatura del mar está cerca de las temperaturas de congelación del agua, o sea de 5° Celsius. Existe entonces un diferencial de temperatura de alrededor de 23° Celsius entre la superficie del mar y los 1.000 metros de profundidad.

Es una consecuencia de la segunda ley de termodinámica que para poder utilizar la energía térmica contenida en un cuerpo es necesario moverla a otro cuerpo de temperatura más baja. Sólo así, parte de la energía térmica trasladada podría convertirse en energía útil, mecánica, eléctrica, etc. La ley postula una eficiencia máxima teórica que es proporcional a la diferencia en temperatura entre los dos cuerpos. Si T_1 es la temperatura del cuerpo caliente y T_2 la temperatura del cuerpo frío, la eficiencia máxima teórica es dada por

$$e = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

donde las temperaturas están en grados Kelvin. Por ejemplo, con una temperatura T_1 de 28° Celsio (301° Kelvin) y T_2 de 5° Celsio (278° Kelvin) la eficiencia teórica sería de 7.6 por ciento.

En el proceso de conversión de la energía térmica del océano (CETO), se aprovecha la diferencia de temperatura entre el agua del fondo y la superficie del mar. Esencialmente, lo que se hace es pasar el agua caliente de la superficie por los tubos de un intercambiador de calor por cuyo exterior fluye un líquido de bajo punto de ebullición llamado el líquido operacional. El agua caliente evapora el líquido operacional, digamos amoníaco, el cual al expandirse mueve un turbogenerador eléctrico. El vapor del amoníaco, una vez expandido, pasa por un condensador que usa el agua fría del fondo del mar como refrigerante. Aquí el vapor del amoníaco se condensa a la forma líquida y se completa el ciclo para un funcionamiento continuo. De esta manera, la máquina CETO puede recobrar grandes cantidades de energía térmica y convertirla en energía útil. (Véase la Figura 1.)

De lo que precede, resulta evidente que la eficiencia termodinámica de la máquina CETO es muy baja debido a la escasa diferencia entre las temperaturas del fondo y de la superficie del mar. Sin embargo, el "combustible" es casi ilimitado y gratis, de modo que si se construyesen máquinas que puedan mover grandes cantidades de agua de mar, se podría generar cantidades considerables de electricidad. Aunque la eficiencia teórica del proceso fluctúa entre un 6 y un 8 por ciento, en la práctica ésta quedaría entre un 3 y un 4 por ciento debido a las pérdidas térmicas, hidráulicas, mecánicas y eléctricas. Por lo tanto, es necesario circular aún mayores volúmenes de agua de mar para producir una cantidad dada de electricidad. Otro ejemplo es que una máquina de 100 megavatios necesitaría 900m^3 de agua por segundo, un flujo comparable al de llenar una piscina olímpica en once segundos; es decir, que para 250 megavatios el flujo sería, si fuese proporcional, $900 \times (2,5)\text{m}^3/\text{seg}$. --icomparable al de llenar dicha piscina en aproximadamente $4\frac{1}{2}$ segundos! La eficiencia del proceso CETO es muy baja si se compara con las centrales termoeléctricas de carbón, petróleo y nucleares, en las cuales la eficiencia es de alrededor de 33% a 40%.

El procedimiento arriba descrito se conoce como el ciclo cerrado de CETO. Existe otro método que se denomina ciclo abierto de CETO (Anderson

& Anderson, 1966:41-46; Watt et al., 1978). En este último lo que se utiliza es el agua de la superficie del mar a una temperatura aproximada de 27°C como líquido operacional. Esta se lleva a unos envases donde la presión atmosférica se reduce, lo que hace posible crear suficiente vapor de agua para mover directamente la turbina. El vapor de agua expandido se condensa con el agua fría del fondo y se devuelve al mar.

En el proceso de ciclo abierto de energía océano-térmica, es necesario obtener vacíos del orden de 1/2 psi ó 1/30 atmósfera para conseguir que el agua del mar se convierta en vapor subitamente. La razón por la cual hay que bajar la presión atmosférica a 1/30 de atmósfera aproximadamente es que para que hierva el agua (es decir se evapore subitamente) hay que bajar la presión exterior hasta igualarla a la tensión de vapor del agua a la temperatura a que ésta se encuentre o condición de saturación. Por ejemplo, a 27°C la tensión de vapor de agua o presión de saturación es 27mm de Hg (una coincidencia numérica), que equivale aproximadamente a 1/30 de una atmósfera.

En otras aplicaciones del ciclo abierto se usan detergentes que actúan como agentes espumantes para acelerar la evaporación del agua. Esto se conoce como CETO de espuma (Zener, 1977), cuyo ciclo aparece en la Figura 2. El Centro para Estudios Energéticos y Ambientales de la Universidad de Puerto Rico en cooperación con la Universidad Carnegie Mellon ha sido pionero en estos estudios (CEER, 1979-1982).

Por último, en otra variante del ciclo abierto de energía océano-térmica llamada de rocío ("mist") se utiliza una caída de agua de mar a presiones reducidas para mover la turbina-generador que produce la electricidad, según se ilustra en la Figura 3 (Ridgway, 1977).

MODALIDADES DE INSTALACION DE CENTRALES CETO DE CICLO CERRADO

Las centrales de energía océano-térmica de ciclo cerrado pueden instalarse en: (a) plataformas flotantes en la superficie del mar ancladas por cables; (b) torres hincadas en el lecho submarino; (c) plantas en tierra firme; o (d) barcos. Describimos a continuación estas modalidades brevemente.

a. Plataformas flotantes ancladas

Las plataformas flotantes ancladas por cables es la modalidad que más divulgación ha recibido. Compañías tales como la Lockheed, TRW, y Sea Solar Power (Trimble & Messinger, 1975; OTEC Power System Development..., 1978), han desarrollado descripciones artísticas de este concepto. (Ver modelo en Figura 4.) Básicamente, consiste de una plataforma localizada en un sitio donde la profundidad del mar es de más de 1.000 metros y de la cual cuelga una tubería para extraer el agua fría del fondo del mar. En esta plataforma se recoge el agua caliente del mar cerca de la superficie y se instala el equipo necesario para producir la electricidad. La plataforma se mantiene fija en su localización por medio de un cable anclado ("anchored cable") en el lecho del mar. Es posible producir electricidad u otros materiales industriales cuya producción consume grandes cantidades de energía tales como amoníaco, hidrógeno o fertilizantes.

b. Torres hincadas en el lecho submarino

Al igual que se construyen plataformas en el mar para extraer petróleo, es posible hincar torres fijas sobre bancos a 300 ó 400 metros de profundidad para instalar centrales océano-térmicas (Sullivan et al., 1980). Se coloca una tubería que baja de la plataforma hasta el fondo del mar y de ahí sigue recostada al lecho del mar hasta llegar a los 1.000 metros de profundidad. (Véase Figura 5.)

c. Plantas ubicadas en tierra firme

En este caso la central se establece en la costa y de ésta se extiende una tubería hasta conseguir las aguas calientes y otra hasta 1.000 metros de profundidad para obtener las aguas frías (Brewer et al., 1979). Este arreglo aparece ilustrado en la Figura 6.

d. Barcos

Este sistema, en el cual la central se construye en un barco (George et al., 1979), permite mover la central para obtener el gradiente de temperatura óptimo en un momento dado o ir de un sitio a otro. Su uso se

adapta ventajosamente en la elaboración de productos cuya preparación requiere grandes cantidades de energía como el hidrógeno o el nitrógeno. El barco sirve a la vez de almacén del producto para embarque posterior a tierra.

En el funcionamiento de estas plantas se han explorado distintos líquidos operacionales (U.S. Dept. of Commerce, NOAA, 1981; Ganic and Wu, 1979). El amoníaco es quizás el más estudiado, pero también se han considerado el freón, el cloruro de metilo, el dióxido de nitrógeno y otros. Igualmente, se han probado varios metales en la construcción de los intercambiadores de calor. El titanio, aunque caro, es el más prometedor pero el aluminio y aleaciones de cobre ofrecen buenas posibilidades.

ENERGIA OCEANO-TERMICA POTENCIAL

En la banda entre los 10°N y 10°S de latitud hay 80 millones de kilómetros cuadrados de mar que reciben más de 215 vatios por metro cuadrado al día para un total de $1,7 \times 10^{10}$ megavatios.

Los Estados Unidos han invertido más de \$200 millones en el desarrollo de la tecnología de CETO. El gobierno de Japón ha invertido más de \$10 millones en el desarrollo de CETO incluyendo una instalación experimental de 35Kwe netos en las costas de la isla de Nauru en el Pacífico. Esta instalación experimental es de ciclo cerrado utilizando freon. Además, han construido otra planta CETO de 50Kwe en Tokunashimo y una instalación de pruebas de 100Kwe en Okinawa.

Las costas del Caribe ofrecen grandes posibilidades para la producción de energía océano-térmica. Hay numerosos lugares específicos cercanos a Puerto Rico, Cuba, Jamaica, Islas Vírgenes y Florida donde existen excelentes condiciones para establecer centrales océano-térmicas. La Figura 7, por ejemplo, da una idea de la distancia entre la costa y profundidades de 1.000, 2.000 y 3.000 metros en el caso de Puerto Rico.

Los últimos informes conocidos indican que existe un renovado interés entre las naciones industrializadas y otros usuarios potenciales por la energía océano-térmica. En Francia, India, Taiwán y Costa de Marfil se realizan es-

estudios y evaluaciones de posibles localidades para centrales de CETO. Jamaica está bastante adelantada en sus exploraciones de esta fuente de energía. La Compañía Ocean Thermal Energy Corporation de Oak Park, Illinois ha propuesto al gobierno de Jamaica construirles una planta CETO de 12 MWe ubicada en tierra firme y vender la electricidad producida a 8 centavos el Kwhr. El gobierno de Jamaica ha llevado a cabo sus propias investigaciones de sitios para CETO y a considerado un sistema híbrido de laguna solar/CETO para la isla. Aparentemente también se ha desarrollado un interés por la energía océano-térmica en México, República Dominicana y Panamá, todos con magníficos sitios para la instalación de plantas de CETO. También Brasil y Curazao, este último en cooperación con el gobierno de Holanda, desarrollan sus propios planes para el establecimiento de plantas océano-térmicas.

Aparte de Hawaii, los Estados Unidos tienen otros sitios apropiados para la instalación de plantas de CETO. La Tabla 1 ofrece un posible escenario para el establecimiento de centrales océano-térmicas en el territorio continental de los Estados Unidos y sus áreas ultramarinas para el año 2000. De lograrse este desarrollo, para esa fecha se alcanzaría a nivel mundial un grado sustancial de producción de energía por medio de centrales océano-térmicas.

ASPECTOS TECNICOS EN EL DESARROLLO DE CENTRALES CETO

Las dificultades que aparecen en el desarrollo de las centrales océano-térmicas no requieren nuevos descubrimientos científicos. Básicamente, involucran los problemas de ingeniería que se encuentran generalmente al pasar de una escala pequeña a una escala más grande o comercial. Algunos de estos problemas técnicos ya han sido superados en experimentos realizados en Hawaii y Puerto Rico. Los componentes principales que necesitan desarrollo son los intercambiadores de calor, los cables de transmisión de potencia, y la tubería de agua fría.

En Hawaii se llevó a cabo una demostración conocida como "Mini-CETO", que fue señalada por la Sociedad Nacional de Ingenieros Profesionales entre los diez proyectos básicos más importantes de la ingeniería en el 1979. Un consorcio de la industria privada y el Estado de Hawaii financió el proyecto.

El "Mini-CETO" consistió de una planta CETO de ciclo cerrado de 15Kwe neto. Operó por períodos cortos de hasta 10 días intermitentemente por 4 meses. El "Mini-CETO" demostró que es técnicamente viable producir energía utilizando la diferencia en la temperatura del mar (Owens and Trimble, 1981). Se encontró que es insignificativa la degradación del coeficiente térmico de transmisión de calor debido al crecimiento de vida marina en los tubos del intercambiador de calor.

Otro proyecto de importancia fue el de CETO-1 que se desarrolló también en Hawaii. CETO-1 consistía de una instalación para probar intercambiadores de calor. Se gastaron \$60 millones en este proyecto que produjo unos resultados muy limitados. Esta operación era para probar diferentes intercambiadores de calor como los del tipo convencional de tubo y revestadura y el de placas verticales. También se ensayó con diferentes tipos de materiales.

En Puerto Rico, el Centro para Estudios Energéticos y Ambientales (CEEA) de la Universidad de Puerto Rico posee un laboratorio flotante que estuvo anclado en el sudeste de Puerto Rico a una milla y media de la costa (Sasscer et al., Dec. 1980, May 1981, June 1981; Morgan et al., June 1981). En este laboratorio se llevaron a cabo estudios sobre el crecimiento de la biota marina en la superficie de los intercambiadores de calor y su efecto en alterar el coeficiente de transporte térmico y por lo tanto la eficiencia de los intercambiadores. Estos estudios han sido los de mayor duración llevados a cabo hasta la fecha en un lugar de posible ubicación futura de una planta de conversión océano-térmica (véase la Figura 7). Las variables consideradas fueron la naturaleza del metal, la clorinación intermitente de las aguas en las inmediaciones del intercambiador de calor y las técnicas y regímenes para su limpieza.

Los metales estudiados fueron tubos de titanio, de aluminio 5052 y de aluminio galvanizado (7072 Alclad 3004). Los estudios demostraron que la biota que cubrió la superficie de los tubos consistía de dos capas: una capa base de bacterias y polisacáridas y otra capa superficial de bacterias de rápida producción. La resistencia térmica de la capa base es del orden de 0.9 a la 1.6 $\times 10^{-5}$ m²-°K/W. Esta capa es adhesiva y promueve el crecimiento rápido de la biota.

El hallazgo más significativo de estos estudios fue demostrar que la degradación en la conducción térmica se debe principalmente a la película de crecimiento bacteriano en la superficie de los tubos del intercambiador. Concluyen estos experimentos que el crecimiento biótico en los intercambiadores de calor no presenta un obstáculo de la magnitud que antes se creía para la comercialización de CETO. Además, surgieron indicios de que es posible el uso de tubería de aluminio en los intercambiadores, lo cual significa una reducción considerable en la inversión de capital. También se encontró que el revestimiento de los tubos de aluminio con cinc extiende la vida útil de los tubos. La Figura 8 resume algunos de los resultados de esa evaluación. Debido a la insuficiencia de fondos, hubo que suspender los estudios planeados para el 1982-83 en los cuales se investigaría en forma similar los efectos químicos y biomarinos sobre la tubería del condensador de agua fría. Para llevar a cabo estos estudios se propuso añadirle al laboratorio flotante una tubería de 12" para extraer agua fría de 925 metros de profundidad.

Otro estudio significativo llevado a cabo desde el laboratorio flotante fue la evaluación de diferentes métodos para prevenir la película de crecimiento bacteriano. Se trataron métodos mecánicos utilizando cepillos y químicos por medio de clorinación. Los análisis indicaron que la clorinación es más efectiva. Se llevó a cabo la clorinación intermitente a una concentración 0,5 ppm por una duración de 28 minutos diariamente. En el caso de los cepillos se encontró que dos pases reducían la resistencia térmica de la capa de superficie en 66% y 10 pases producían una reducción de 90%. Las figuras 9, 10, y 11 resumen los resultados de estas pruebas. Seis de estos experimentos con aguas de superficie del mar y otros similares en Hawaii han determinado que existen bajos niveles de corrosión con concentración de clorinación de hasta 70 ppb. Resultados preliminares de pruebas de corrosión en Hawaii con aguas de 1.000 metros de profundidad han demostrado la necesidad de utilizar metales o aleaciones superiores al 5052 y Alclad 3. La acidez o pH más bajo de las aguas de profundidad son causantes de esta marcada diferencia recién descubierta.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Además de los estudios técnicos previamente discutidos, el CEEA ha lle-

vado a cabo investigaciones del ecosistema, es decir de las características ambientales de los sitios potencialmente aptos para la instalación de plantas océano-térmicas. En la Tabla 2 se comparan características físico-químicas en islas como Hawaii, Puerto Rico, Islas Vírgenes y Guam, océanos (Atlántico y Pacífico) y el Golfo de México pertinentes al efecto de la mezcla de las aguas sobre las propiedades fóticas y el contenido de nitratos, fosfatos, sílice y oxígeno disuelto (Hernández et al., 1979). Es preciso conocer todos los parámetros ambientales importantes a fin de lograr un diseño óptimo de la planta y tener una base para evaluar los efectos ambientales durante su operación (véase Figura 12).

Es pertinente señalar que cuando se extrae agua del mar de profundidades como de 1.000 metros, éstas tienen un alto contenido de nutrientes. En el caso de las centrales océano-térmicas en tierra, esto hace posible establecer industrias de acuacultivo y producir cosechas de alimentos marinos para los humanos y los animales. Este es el concepto de centros híbridos de energía océano-térmica, es decir, un conjunto de centrales en las cuales se puede producir electricidad, amoníaco e hidrógeno, cosechar alimentos marinos, extraer minerales u otros elementos importantes del océano, o una combinación de éstos. Indudablemente, este aspecto es de gran importancia y debe considerarse seriamente en los planes de los países caribeños y latinoamericanos para la explotación integral de la energía térmica y los recursos naturales del océano.

Los primeros estudios oceanográficos los llevó a cabo el CEEA en el área de Punta Tuna en noviembre de 1979. Estos estudios incluyeron 1) análisis químicos, 2) determinaciones de corrientes oceánicas, y 3) caracterización de la biota.

La distribución promedio de la temperatura como función de profundidad encontrada en Punta Tuna se presenta en la Figura 13. Se determinaron gradientes de temperatura de 22°C de la superficie a 900 metros. La salinidad y el oxígeno como función de profundidad fueron determinados según se indica en las Figuras 14 y 15. También se determinaron las velocidades de las corrientes marinas a diferentes bandas de profundidad. En la Figura 16 podemos notar que a profundidad de 25 a 50 metros la velocidad promedio es 10 cm/seg; de 100 a 150 metros de profundidad es 8 cm/seg; de 250 a 500

metros de profundidad es 5 cm/seg. Con relación a los nutrientes, se determinó un aumento en su concentración a mayor profundidad. Esta información se resume en la Figura 17. La información ecológica recopilada en Punta Tuna y comparada con otros posibles sitios para la instalación de unidades CETO indican que Punta Tuna reúne todas las características oceánicas necesarias para dicha instalación. Además, la cercanía a la costa sudeste de Puerto Rico y su accesibilidad al sistema eléctrico hacen de este sitio uno de los más aptos para la instalación de unidades CETO.

A través de a estos estudios el CEEA ha llegado a la conclusión general de que no deben surgir problemas ambientales significativos al instalarse una planta de CETO en Punta Tuna. Una de las mayores preocupaciones de los ambientalistas es el peligro del daño que pueda sufrir el plancton al ser forzado por los tubos del intercambiador de calor y descargado al océano a diferentes niveles. Sin embargo, se encontró que en aquella zona marina existen turbulencias naturales locales en forma de pequeños remolinos. Estando el plancton acostumbrado a este grado de turbulencia, es de esperarse que su régimen natural de vida no sea afectado por las descargas de CETO.

El estudio más reciente llevado a cabo en Puerto Rico se hizo en diciembre de 1982. Para estos estudios se utilizó el sumergible "Alvin" de 29 pies de largo y 24 toneladas, propiedad del Instituto Oceanográfico Woods Hole de Massachusetts. Esta embarcación tiene capacidad para 3 personas poder examinar visualmente y tomar muestras por 8 horas hasta 3.600 metros de profundidad. El propósito de este estudio fue examinar el lecho del océano para identificar localizaciones para hincar torres para CETO y descansar la tubería de agua fría. Observaciones en las cercanías de Punta Tuna indicaron que el lecho contine rocas carbonadas fracturadas que no son adecuadas para este tipo de instalación. Se identificó otro lecho más adecuado en la isla Caja de Muerto al sur de Ponce que tiene pendientes suaves de 13°. La Figura 7 indica los sitios donde se hicieron las tres exploraciones y la Figura 18 resume los resultados en las cercanías de isla Caja de Muerto.

CONCLUSION

Los estudios realizados por el CEEA sugieren que los costos de producción de electricidad por medio de la energía océano-térmica podrán competir con los del carbón para principios de la próxima década (Iriarte y Sardina, 1980). Para el año 1995 los costos de generación de una central de CETO se estiman en 15 centavos de dólar por kilovatio-hora, lo que representa menos de una cuarta parte de lo que costaría producir energía eléctrica del petróleo. La instalación de una central océanotérmica de 250 megavatios costaría aproximadamente US\$773 millones en el año 1990.

En este trabajo hemos presentado los principios básicos en que se sustenta la tecnología de conversión de la energía térmica del océano (CETO). Hemos examinado asimismo diversos factores técnicos y ambientales que se han estudiado en Puerto Rico por el CEEA y que inciden en el desarrollo y aplicación de esta tecnología como fuente de energía renovable, con referencia especial a Puerto Rico.

A base de la discusión y el análisis que hemos hecho, podemos concluir que la instalación y operación de centrales de energía océano-térmica es un problema multidisciplinario que involucra la ingeniería, la biología marina y la planificación económica y social, y que necesita formularse en forma integral para emprender la búsqueda de soluciones viables.

Los países de este Hemisferio deben aunar sus esfuerzos y recursos científicos y técnicos en un plan de acción común para propiciar el desarrollo de centrales de energía océano-térmica. Ciertamente, esta tecnología de energía renovable ofrece una de las mejores alternativas para lograr la independencia energética que se hace cada día más necesaria ante la incertidumbre en torno al precio y el suministro del petróleo.

REFERENCIAS

- Anderson, J.H. and J.H. Anderson, Jr. (April 1966). "Thermal Power from Sea Water." Mech. Eng. 88:41-46.
- Avery, W.H. and G.L. Dugger (July 1980). "The Contributions of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) to World Energy Needs." Journal of Ambient Energy 1:177-90.
- Brewer, J.A., J. Minor and R. Jacobs (1979). "Feasibility Design Study, Land Based OTEC Plants." Final Report. Deep Oil Technology Inc., Long Beach, California.
- Bonnet, J.A., y F. Pérez Bracetti (octubre 1978). "Energía Océano-Térmica para Latinoamérica." CEER/UPR, Río Piedras, Puerto Rico.
- Bonnet, J.A., and M. Iriarte (February 9, 1984). "OTEC Research in Puerto Rico." Presented at Technology Assessment Review Meeting, Office of Technology Assessment, U.S. Congress, Washington, D.C.
- Center for Energy and Environment Research, University of Puerto Rico (1979 to 1982). Annual Reports.
- Claude, Georges (Dec. 1930). "Power from Tropical Seas." Mech. Eng. 52:1039-44.
- Dambly, B.W. (Dec. 1981). "A 40 MWe Floating OTEC Plant at Punta Tuna, Puerto Rico." AIAA Paper 81-2564, AIAA 2nd Terrestrial Energy Systems Conference, Colorado Springs, Colorado.
- Draley, B.W. (Sept. 1981). "OTEC Biofouling, Corrosion, and Materials Program: Progress Report for the Period March 1978-March 1981." ANL/OTEC-BCM-024, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- Dugger, G.L., J. Francis and W.H. Avery (1978). "Technical and Economic Feasibility of Ocean Thermal Energy Conversion." Solar Energy 20:259-74.
- Dugger, G.L., D. Richards, E.J. Francis and W.H. Avery (1983). "Ocean Thermal Energy Conversion: Historical Highlights, Status and Forecast." Journal of Energy 7:293-303.
- Dugger, G.L. et al. (1982). "OTEC Energy Products and GEOTEC Plants." Pp. 409-419 in Proceedings of ASME Solar Energy Technical Conference, Albuquerque, New Mexico.
- Ganic, E.N. and J. Wu (1979). "Comparative Study of Working Fluids for OTEC Power Plants." ANL/OTEC-TM-1, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- George, J.F. and D. Richards (May 1980). "A Baseline Design of a 40 MW OTEC Power Plant." Applied Physics Laboratory (APL/JHU SR 80-1), Johns Hopkins University, Laurel, Maryland.

George, J.F., D. Richards and L. Perini (1979). "A Baseline Design of an OTEC Pilot Plantship." Applied Physics Laboratory (APL/JHU SR 78-3), Johns Hopkins University, Laurel, Maryland.

Hernández, A., M.L. Suárez, G.C. Goldman (1979). "A Historical Review of the Physical and Biological Characteristics of the Ocean Near Puerto Rico, Relative to an OTEC Power Plant." CEER 0-051. Río Piedras, Puerto Rico, CEER/UPR.

Iriarte, M. and R.H. Sardina (1980). "Energy Analysis and Socioeconomic Considerations for Puerto Rico." CEER X-072. Río Piedras, CEER/UPR.

Jones, M.S., Jr. et al. (Dec. 1981). "Proposed 12.5 MWe Shell Mounted OTEC Pilot Plant for Power, Water and Mariculture at St. Croix, [U.S.V.I.]." AIAA Paper 81-2546, AIAA 2nd Terrestrial Energy Systems Conference, Colorado Springs, Colorado.

Kajikawa, T. (1982). "Preliminary Design of a 1 MWe OTEC Test Plant." ASME Journal of Solar Energy Eng. 104:3-8.

Marina, J. and J. Pérez (1981). "Proposed OTEC Punta Tuna [Puerto Rico] Pilot Plant." AIAA Paper 81-2565, AIAA 2nd Terrestrial Energy Systems Conference, Colorado Springs, Colorado.

Meyer, R.A. (1982). "Full Details, Including Technical Data, on Japanese OTEC Demonstration Plant." Solar Ocean Energy Liaison 6:1,3-5.

Mitsui, T., F. Ito, Y. Seya and Y. Nakamoto (Sept. 1983). "Outline of the 100KW OTEC Pilot Plant in the Republic of Nauru." IEEE Power Eng. Review.

Morgan, T.O., D.S. Sasscer and C.J. Rivera (June 1981). "Macrofouling in Simulated OTEC Evaporators at Punta Tuna, Puerto Rico." Proc. Eighth Ocean Energy Conference, Washington, D.C.

National Research Council, U.S.A. (1983). Needs in Science and Technology for Development in Caribbean Island Nations. Report of a Workshop, Washington, D.C., August 30-31, 1982. Washington, D.C., National Academic Press.

"Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Power System Development Utilizing Advanced, High Performance Heat Transfer Techniques" (1978). Volume 1, Conceptual Design Report. TRW Systems and Energy, Redondo Beach, California.

Owens, W.L. and L.C. Trimble (1981). "Mini-OTEC Operational Results." ASME Journal of Solar Eng. 103:233-240.

Pandolfini, P.P. et al. (1981). "Alcald-Aluminum, Folded-Tube Heat Exchangers for Ocean Thermal Energy Conversion." Paper presented at 3rd Miami Int'l. Conference on Alternative Energy Systems, Miami Beach, Florida.

Ridgway, S.L. (1977). "The Mist Flow OTEC Plant." Proceedings of the 4th OTEC Conference, Energy Research and Development Administration, Washington, D.C.

Sasscer, D.S., T.R. Tosteson and T.O. Morgan (Dec. 1980). "Biofouling in Simulated OTEC Evaporator Tubes on At-Sea Research Platform at Punta Tuna, Puerto Rico." Proceedings of 3rd Miami Int'l. Conference on Alternative Energy Sources, Miami Beach, Florida.

Sasscer, D.S. et al. (1981). "In-Situ Biofouling of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Evaporator Tubes." ASME Journal of Solar Energy Eng. 103:121-125.

Sasscer, D.S. et al. (June 1981). "Microbiofouling of Aluminum and Titanium OTEC Evaporator Tubes at a Potential OTEC Site." Proceedings of Eighth Ocean Energy Conference, Washington, D.C.

Sullivan, S.M. et al. (1980). "Draft Environmental Assessment, OTEC Pilot Plants." Interstate Electronics Corp., Anaheim, California.

Trimble, L.C. and B. Messinger (April 1975). "Ocean Thermal Energy Conversion System Evaluations." AIAA Paper 75-616, AIAA/AAS Solar Energy for Earth Conference, Los Angeles, California.

Trimble, L.C. and R.L. Potash (1980). "Design and Construction of an Ocean Thermal Energy Conversion Test Plant." ASME Journal of Solar Energy Eng. 102:41-46.

U.S. Department of Commerce, NOAA (July 1981). "Final Environmental Impact Statement for Commercial OTEC Licensing." Washington, D.C.

Veziroglu, T.N. (1982). "La energía océano-térmica: Su estado actual y su futuro." Pp. 209-229, en Energías no convencionales. Coral Gables, Fla., Clean Energy Research Institute, University of Miami.

Watt, A.D., R.S. Mathews and R.E. Hathaway (1978). "Open Cycle Thermal Energy Conversion." In Proceedings of the Fifth Ocean Thermal Energy Conversion Conference, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

Zener, C. (1977). "The Foam OTEC System: A Proposed Alternative to the Closed Cycle OTEC System." Proceedings of Fourth OTEC Conference, U.S. Energy Research and Development Administration, Washington, D.C.

TABLA 1
PROYECCIONES CETO PARA EL AÑO 2000

REGION	TIPO DE CENTRAL	TAMARO DE UNIDAD (Mwe)	NUMERO DE UNIDADES	TAMARO DE CENTRAL (GWe)	% DE TOTAL DE NECESIDAD PROYECTADA
CARGA FUNDAMENTAL ELECTRICA					
Golfo de México	Ciclo Cerrado	400	5	2.0	1
Puerto Rico	Ciclo Cerrado	400,100,40	4	0.94	
	Ciclo Abierto	40	2	0.08	
	SUBTOTAL PUERTO RICO		6	1.02	5
Islas Vírgenes	Ciclo Cerrado o Abierto	40	1	0.04	100
	Ciclo Cerrado o Abierto	40	1	0.04	100
	SUBTOTAL ISLAS VIRGENES		2	0.08	100
Hawaii	Ciclo Cerrado	400,100	3	0.60	80
	Ciclo Cerrado o Abierto	40	1	0.04	50
	Ciclo Cerrado	40	1	0.04	100
	Ciclo Cerrado o Abierto	40	2	0.08	90
	SUBTOTAL HAWAII		7	0.76	80
Guam	Ciclo Cerrado o Abierto	100,40	3	0.18	100
Islas Marianas del Norte	Ciclo Cerrado o Abierto	10	2	0.02	90
TOTAL CARGA FUNDAMENTAL ELECTRICA			25	4.06	--
BARCOS PLANTAS DE AMONIACO					
Golfo de México	Ciclo Cerrado	500	9	4.5	--
Atlántico del Sur	Ciclo Cerrado	500	9	4.5	--
TOTAL BARCOS PLANTAS DE AMONIACO			18	9.0	
BARCOS PLANTAS DE ALUMINIO					
Golfo de México	Ciclo Cerrado	400	1	0.4	--
Atlántico del Sur	Ciclo Cerrado	400	1	0.4	--
Pacífico del Norte	Ciclo Cerrado	450	1	0.4	--
TOTAL BARCOS PLANTAS DE ALUMINIO			3	1.2	
GRAN TOTAL			46	14.26	

Fuente: U.S. Department of Commerce, NOAA, 1981.

TABLA 2
 CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DE POSIBLE UBICACION DE CENTRALES DE CETO

Parámetro	Profundidad (m)	Hawaii, Puerto Rico, Islas Vírgenes, Territorio en Fideicomiso del Pacífico, Guam	Océanos Atlántico y Pacífico	Golfo de México
Profundidad de capas mezcladas (m)		40-100	10-80	60-120
Profundidad de zona fótica (m)		120-140	120-140	50-125
Nitrato (mg-atom m ⁻³)	0-50 m 125 m 900 m	0.05-0.7 0.6-0.7 23-24	0.04-0.2 0.2-0.5 29-34	0.17-1.0 7 30
Fosfato (mg-atom m ⁻³)	125 m 900 m	0.2-0.5 2.0-3.0	0.3-0.6 1.4-2.0	0.5 1.9
Silicato (mg-atom m ⁻³)	0-50 m 125 m 900 m	1.0-4.8 1.0-3.7 25-86	0.0-2.4 5-25 20-150	0.5-4.4 2 25
Disuelto	0-50 m	4.8-7.5	4.3-4.8	4.8
Oxígeno (ml litro ⁻¹)	125 m 900 m	3.0-7.4 1.0-3.4	3.0 3.4	3.6 3.9

Fuente: U.S. Department of Commerce, NOAA, 1981.

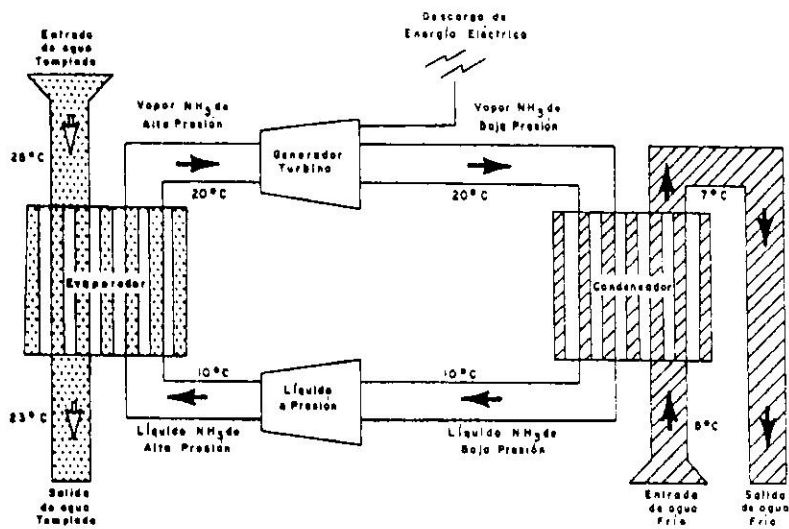


Figura 1. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE ENERGIA CETO DE CICLO CERRADO

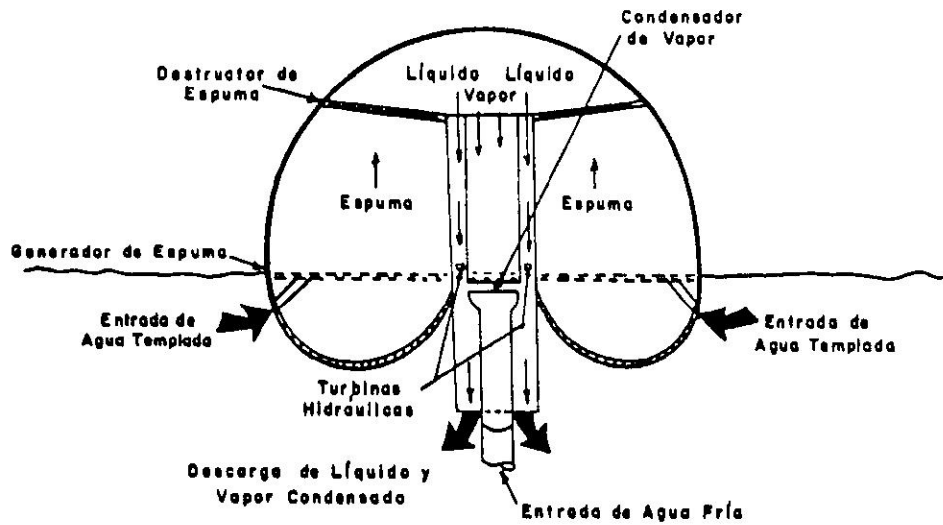


Figura 2. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE ENERGIA CETO DE ESPUMA

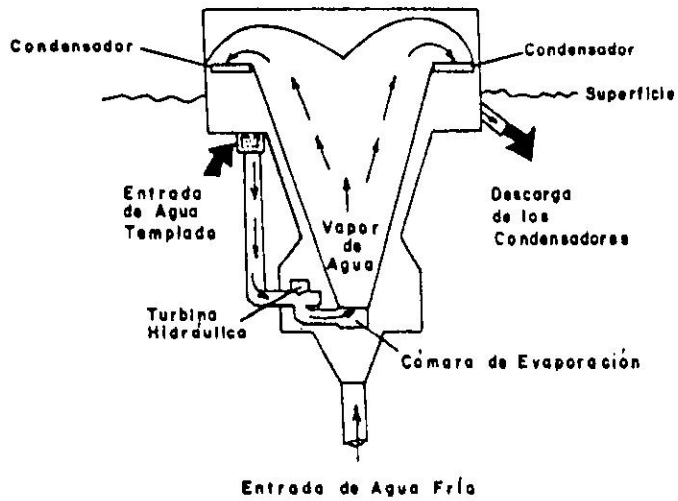


Figura 3. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE ENERGIA CETO DE ROCIO

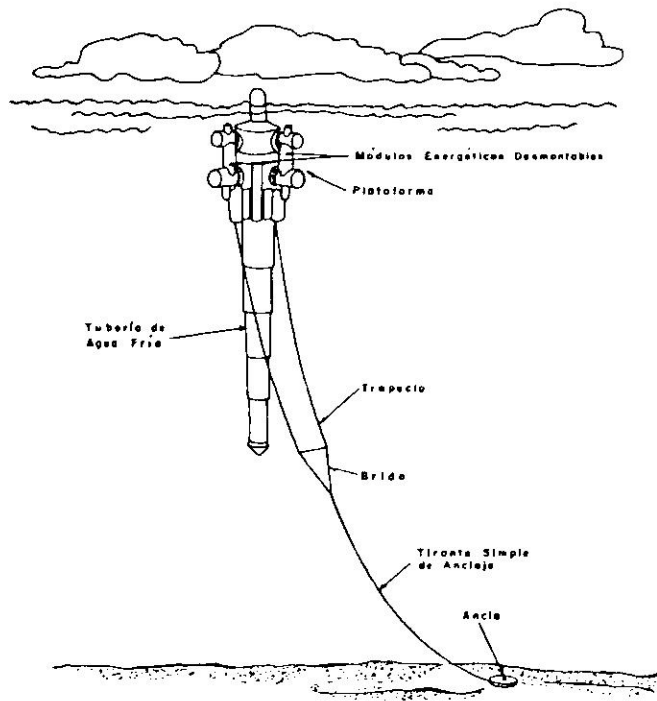


Figura 4. PLATAFORMA CETO ANCLADA. PROPUESTA POR LOCKHEED OCEAN SYSTEMS (186.5 MW_e)

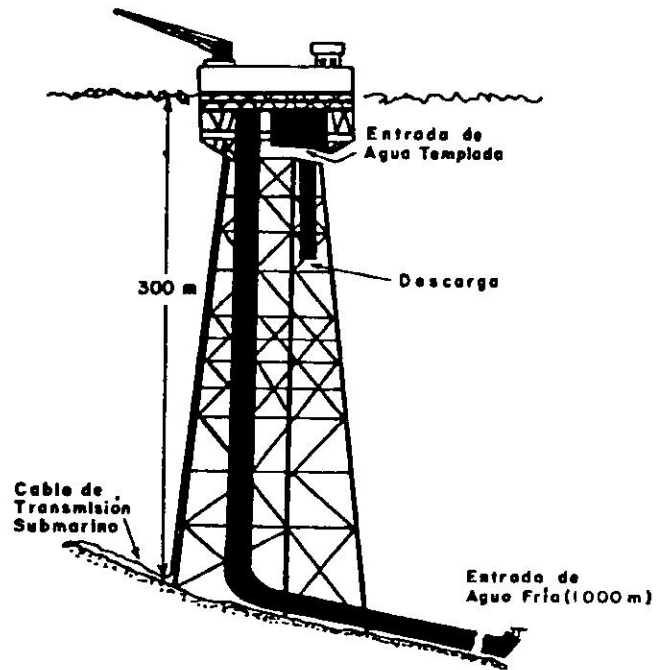


Figura 5. DISEÑO TÍPICO DE TORRE HINCADA EN EL LECHO SUBMARINO

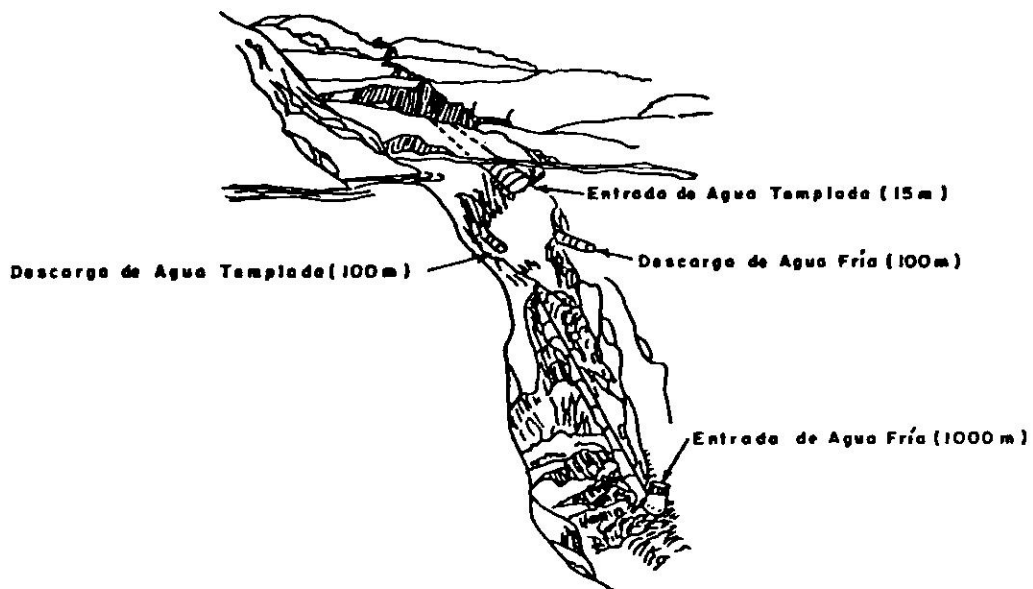


Figura 6. DISEÑO TÍPICO DE PLANTA CETO EN TIERRA

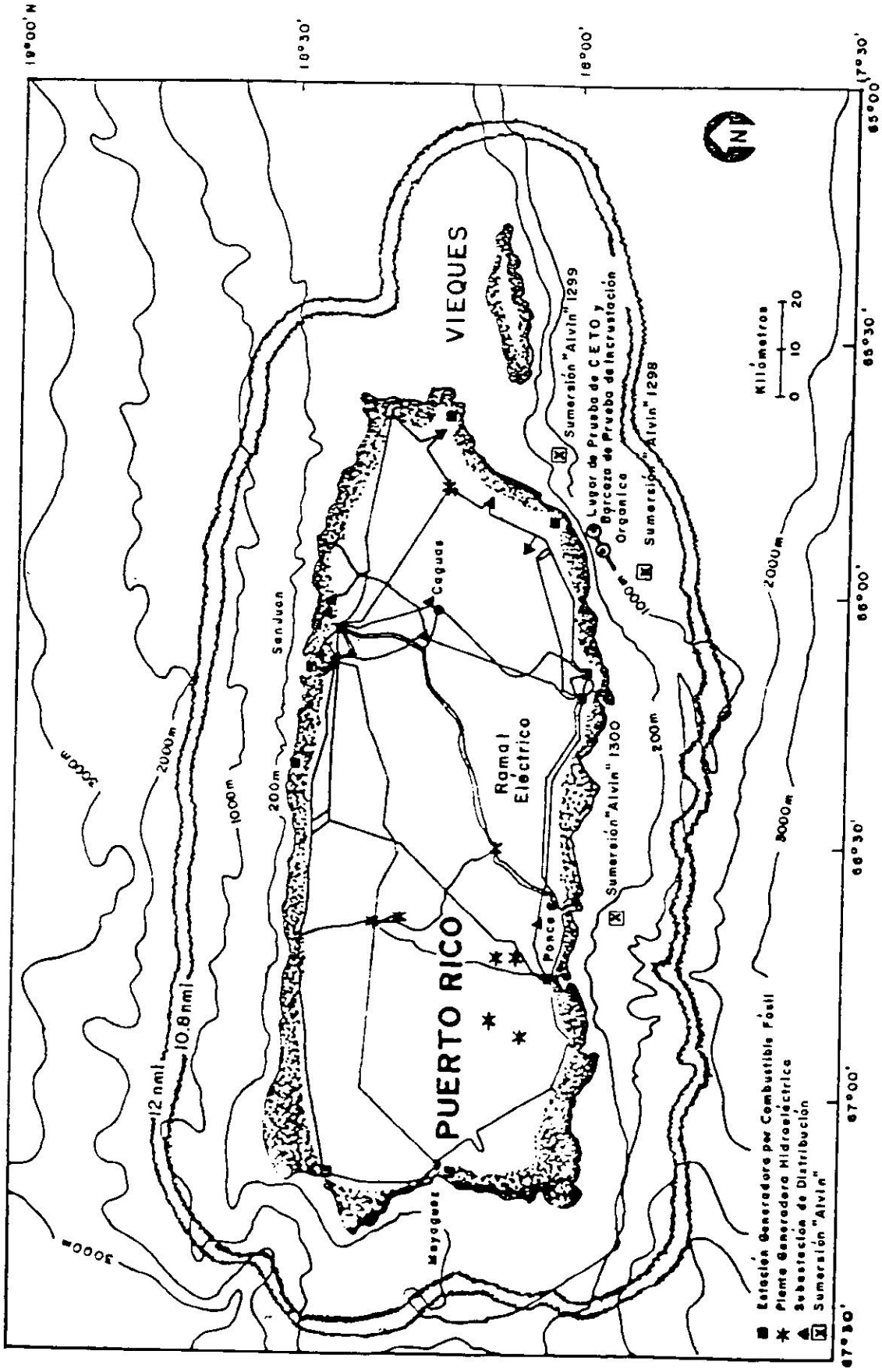


Figura 7. MAPA DE PUERTO RICO MOSTRANDO PROFUNDIDADES OCEANICAS Y LUGARES DE 3 SUMERSIONES DEL "ALVIN" EN DICIEMBRE DE 1982.

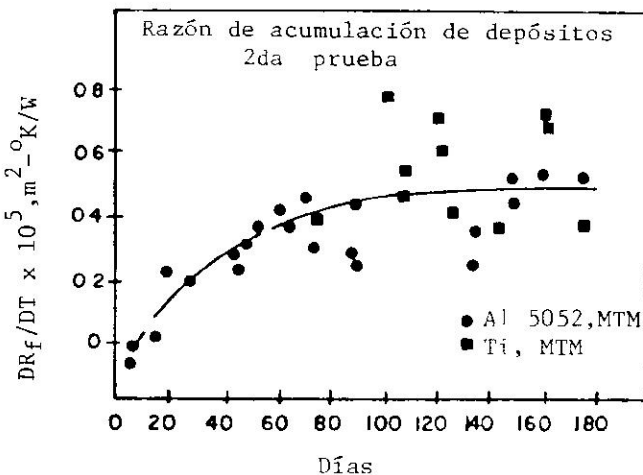
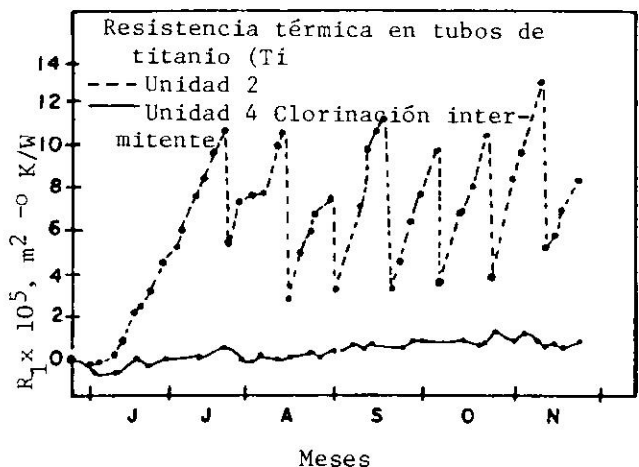
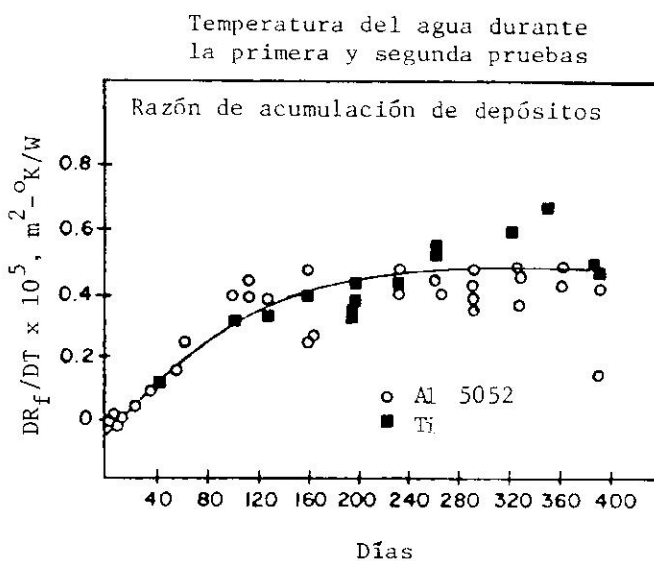
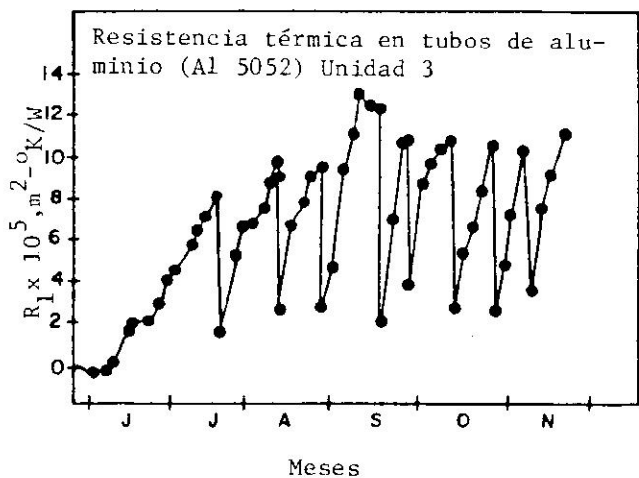
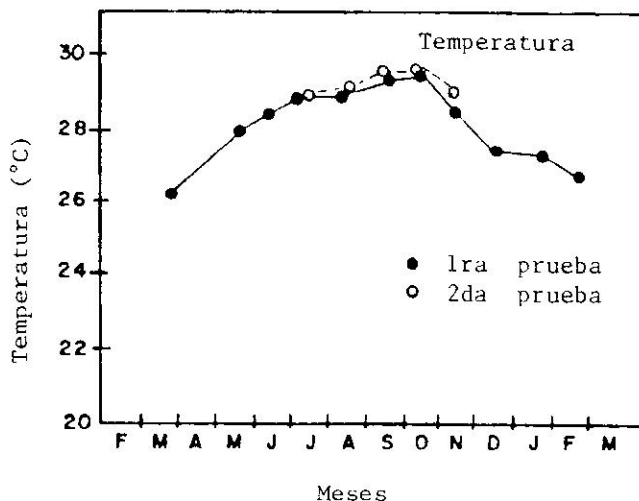
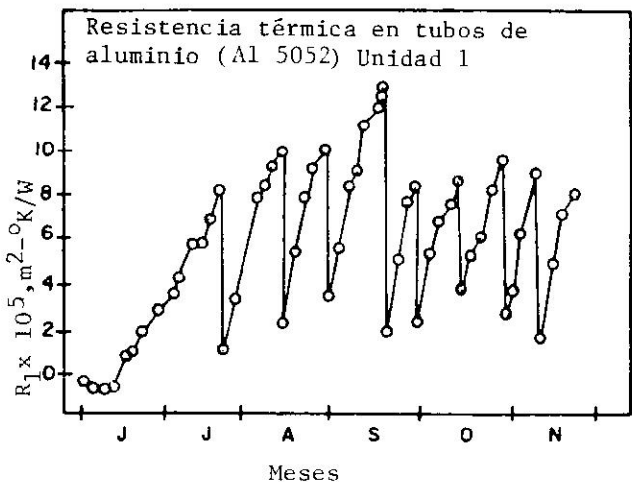


Fig 8 Resistencia térmica debido a depósitos (R_f) para tres pruebas sin cloro y una prueba con clorinación.

Fig 9 Efecto de la razón de acumulación de depósitos en R_f (dR_f/dt) durante ambas tandas de prueba.

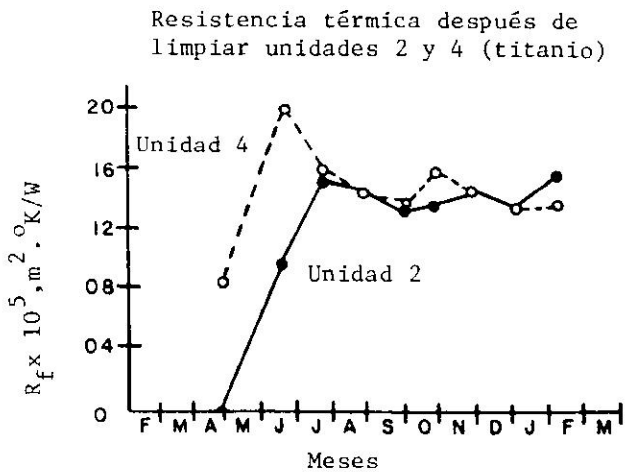
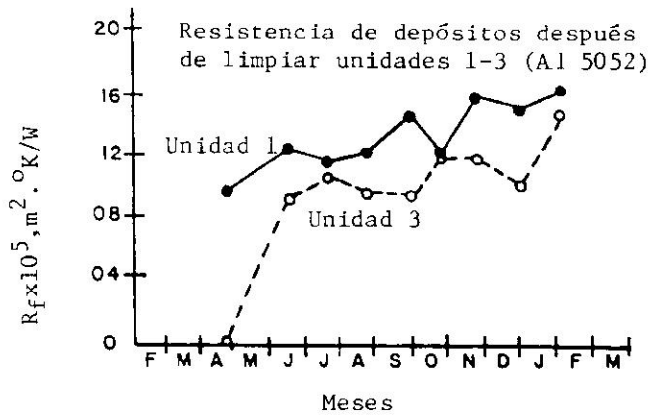
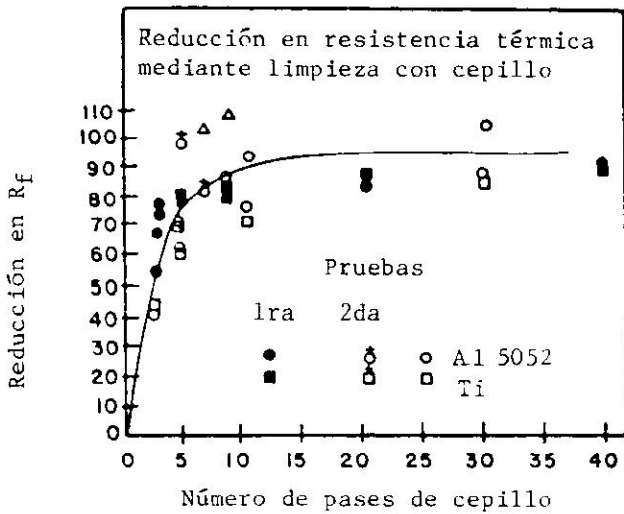


Fig 10 Resistencia térmica del aluminio y titanio después de limpiar con cepillo durante las primeras pruebas

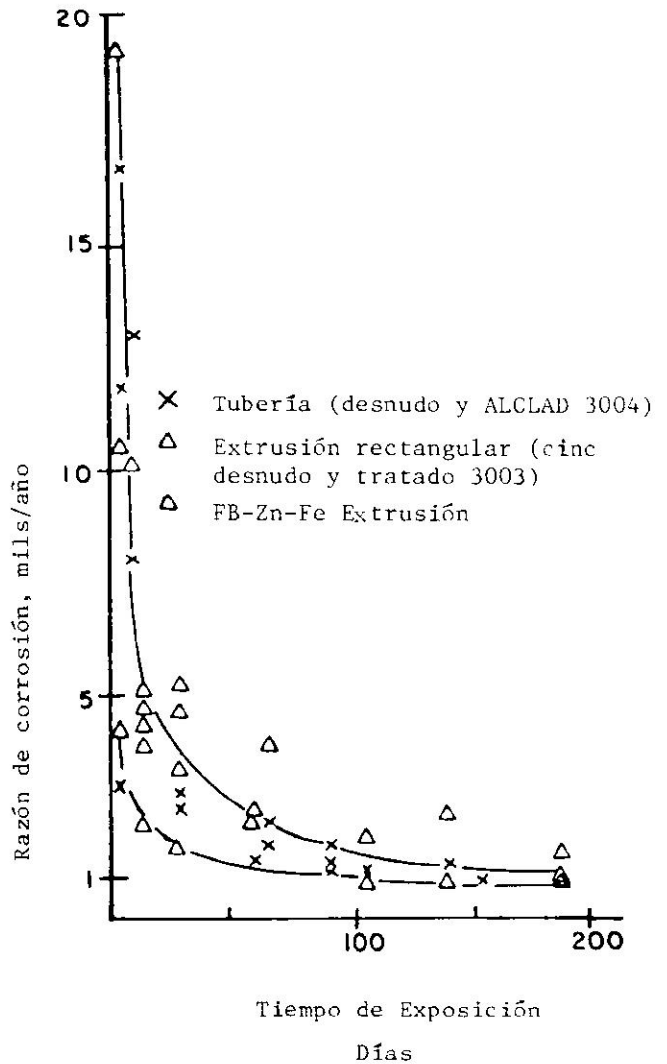


Fig 11 Promedio de razón de corrosión como función de tiempo de las muestras en agua de mar fluyendo a 1.8 m/s

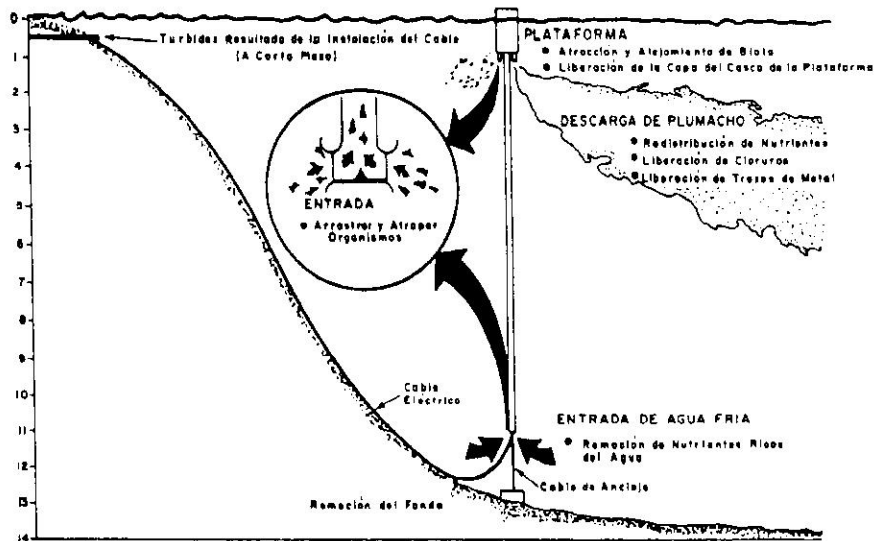


Figura 12 EFECTOS AMBIENTALES DE LA OPERACION CETO

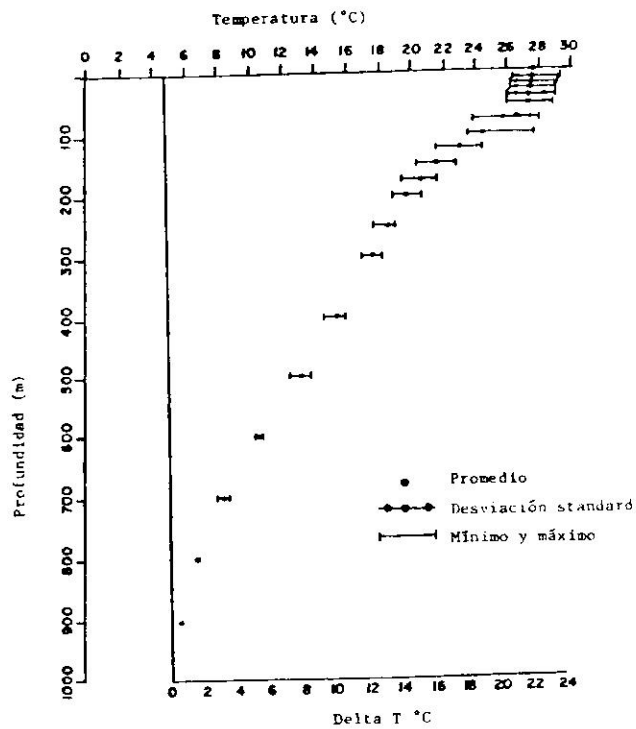


Fig 13 Perfil de temperaturas promedio medidas en Punta Tuna desde agosto 1978 a junio de 1979.

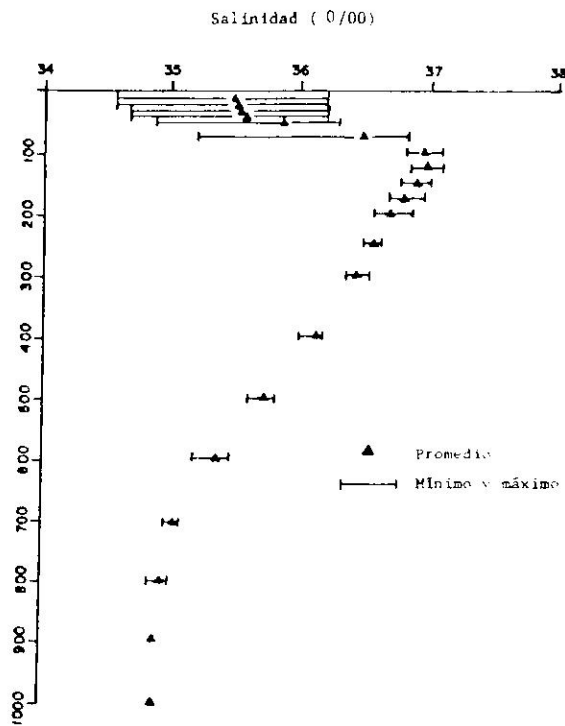


Fig 14 Perfiles de salinidad promedio observados en Punta Tuna desde agosto 1978 a junio 1979.

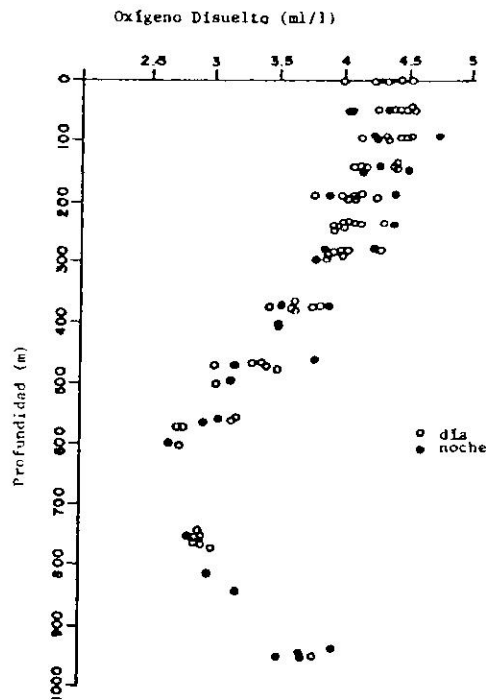


Fig 15 Perfil de oxígeno disuelto para Punta Tuna de agosto 1978 a junio 1979.

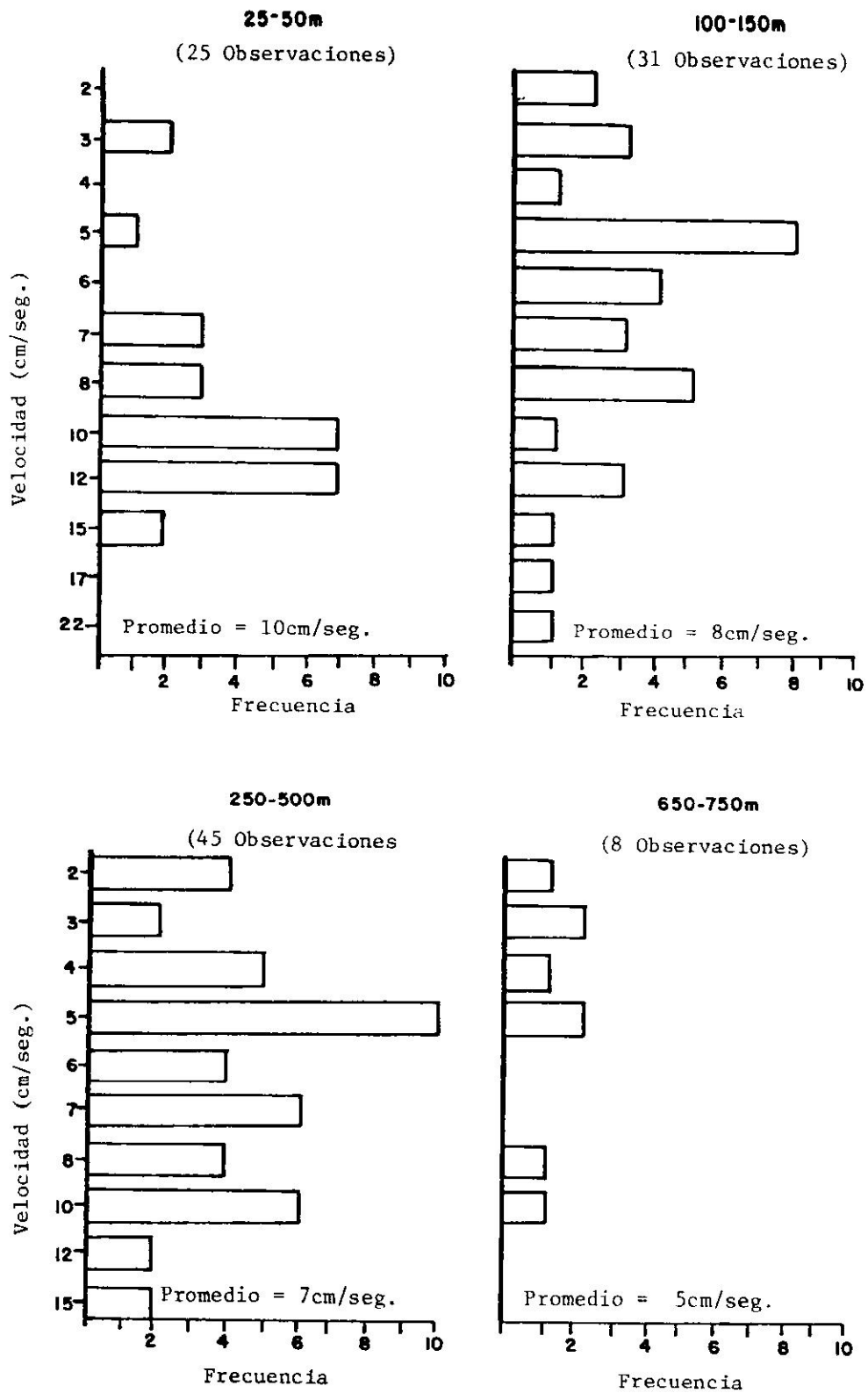
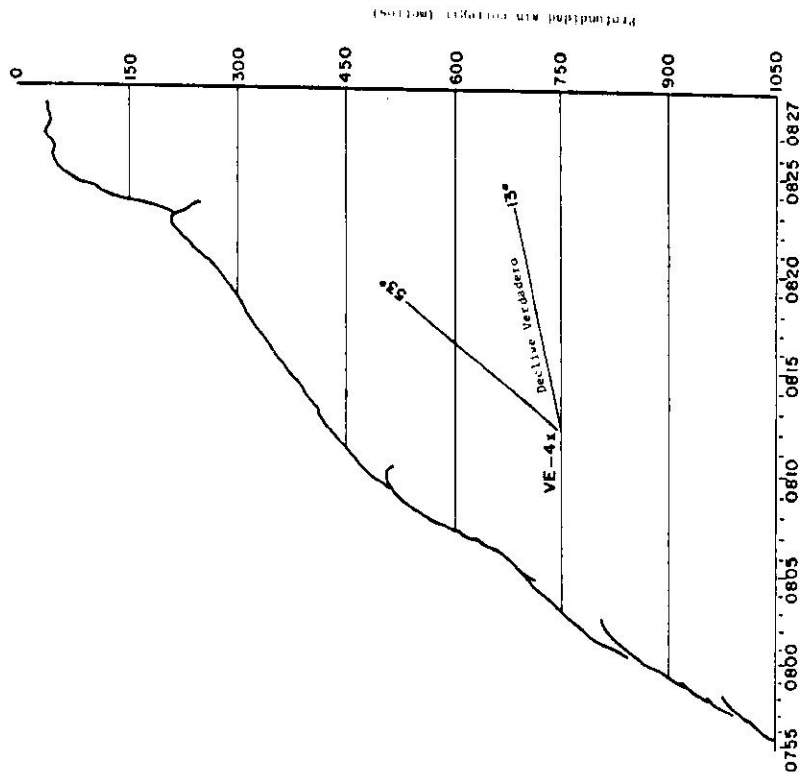


Fig 16 Distribución de las frecuencias de velocidad en Punta Tuna desde octubre 1978 a junio 1979. (Cuatro bandas verticales de profundidad son consideradas.)



TIEMPO
 Prueba a 12 KHz - 4 diciembre 1982
 Surdestr de isla de Caja de Muertos
 Fig 18 Trazado de estudio producido por el método de reflexiones de ondas acústicas, ilustrando el perfil del fondo del océano entre 1050m y 50m de profundidad. Se ilustra el perfil aparente con exageración vertical (4:1) y el verdadero.

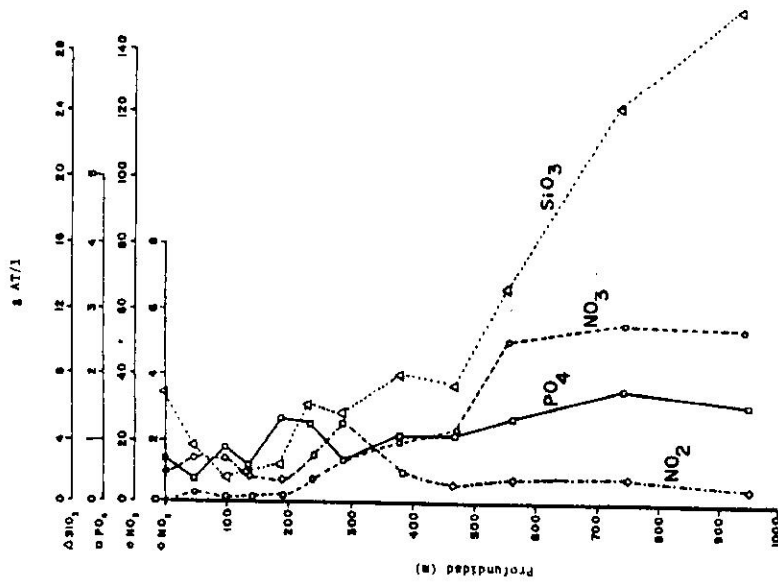


Fig 17 Perfiles de valores promedio de la concentración de varios nutrientes observados en Punta Tuna de octubre de 1978 a junio 1979.

