

## ESTUDIOS DE ECOLOGIA FITOPLANCTONICA

### EN LA BAHIA DE VALPARAISO.

#### I. LA TEMPERATURA SUPERFICIAL Y LA RADIACION SOLAR.

MARIANO PIZARRO (\*)

#### INTRODUCCION

El objeto de este trabajo es analizar las variaciones de temperatura superficial y la radiación solar registradas durante los últimos doce años en el área de la bahía de Valparaíso, a fin de determinar el significado que ellas pueden tener para la caracterización del medio ambiente de la bahía desde el punto de vista ecológico.

Los cambios de la temperatura superficial pueden ser un índice de ciertos procesos circulatorios que tienen marcada influencia sobre las actividades del fitoplancton y, a través de éste, a toda la comunidad marina. La correcta descripción de las características térmicas así también como la distribución de la energía radiante en el área de la bahía de Valparaíso, constituye una etapa básica para los estudios sobre la ecología del fitoplancton.

El primer análisis de la distribución de la temperatura superficial del mar y otras características meteorológicas de la zona fue realizada por Reyes (1960). Este autor llama la atención sobre la necesidad del análisis de la temperatura del mar en relación con los procesos hidrológicos que deben tener lugar en la bahía. En cambio no ha sido realizado hasta ahora ningún estudio de la radiación solar en relación con el ambiente marino. El presente trabajo solo enfoca aquellos aspectos directamente relacionados con la actividad del fitoplancton.

Los datos que se han utilizado en este análisis provienen en su mayor parte de los registros del Departamento de Oceanología (ex-Estación de Biología Marina de Montemar) desde 1959. También se han utilizado informaciones facilitadas por el CENDOC y por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María.

#### TEMPERATURA SUPERFICIAL

Teóricamente, la temperatura superficial del mar debería reflejar las variaciones de la intensidad de la radiación solar incidente. En estas condiciones las temperaturas máximas y mínimas superficiales deberían presentarse coincidiendo con las épocas del año en las cuales la radiación es máxima y mínima respectivamente.

Una serie de factores de distinta naturaleza alteran el modelo ideal de una onda sinusoidal que debería presentar la distribución anual de la temperatura superficial. Analizando los registros térmicos de un cierto número de años, es posible tener una distribución promedio anual que reflejara solamente la influencia de los factores "normales", es decir, de

(\*) Dirección actual: Centro Nacional Patagónico. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

aquellos que se presentan en forma regular o periódica, anulando en cambio a todos los factores aleatorios que contribuyen a alterar el cuadro normal. Es indudable que disponiendo de un gran número de datos o registros, se tendrá un conocimiento más preciso de la "curva media anual".

Mediante procedimientos estadísticos simples es posible adoptar un criterio que permita separar las variaciones de temperatura debidas a factores aleatorios de aquellas variaciones que si bien no ocurren en forma regular, son manifestaciones de fenómenos físicos que es posible identificar y eventualmente prever.

Desde 1959 se determina diariamente la temperatura superficial del mar en la caleta Montemar. Las medidas se realizan tres veces al día a las 08.00, a las 14.00 y a las 19.00 horas. Junto con estas mediciones se efectúan otras relacionadas con las condiciones meteorológicas del área (Reyes, *op. cit.*).

La temperatura media anual de las 08.00 horas en la bahía de Valparaíso, considerando los años 1959 a 1970 inclusive, es de 12,9°C. Los valores medios anuales máximos y mínimos observados en ese periodo son respectivamente 13,2° y 12,5°C. En la tabla Nº 1 se anotan las medias anuales para cada uno de esos años.

TAELA Nº 1.— Medias anuales de temperatura (°C), para los años 1959 a 1970.

1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
12,7	12,8	12,6	12,8	13,1	12,6	13,2	12,9	12,5	12,8	13,2	13,0

La fluctuación anual de la temperatura no es de gran amplitud. Las máximas se observan en enero y febrero con 14,2°C y la mínima de 11,7°C en septiembre. Estos valores indican una fluctuación térmica media anual de 3,3°, lo que indicaría un área térmicamente estable. En la tabla Nº 2 se indican las medias mensuales.

TABLA Nº 2.— Medias mensuales de temperatura (°C), para los años 1959 a 1970.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
14,2	14,2	13,7	12,9	12,7	12,6	12,2	12,0	11,7	12,0	12,7	13,4

Las fluctuaciones de un día a otro son en cambio bastante amplias y en los meses de verano suelen tener una magnitud comparable a la anual. Durante el día se observan también variaciones de temperatura superficial. Este fenómeno se presenta también a cierta distancia de la costa como lo hizo notar Reyes (1960). Las temperaturas de la superficie del mar medidas simultáneamente sobre la costa y a unas dos millas de la misma no son iguales, ni la diferencia constante durante el día. Estas son máximas a la mañana tendiendo a disminuir a la tarde. Durante el año se observa también un fenómeno análogo, las diferencias son máximas en verano, pudiendo llegar a 1,5°C ó más, tendiéndose a anular en los meses de invierno (Reyes, *op. cit.*).

Estos hechos crean una inseguridad respecto a la verdadera temperatura superficial de la bahía en base a la determinación de la misma

en la costa. Pero en cambio las diferencias que experimenta la temperatura del mar según medidas sobre la costa en dos días sucesivos, es igual a la que sufren las aguas costeras en el mismo lapso. Esto es cierto si ambas mediciones han sido efectuadas a la misma hora del día.

Estas características y el hecho que los muestreos para los trabajos oceanológicos se efectúen en la mañana, se han tenido en cuenta para utilizar solamente los datos correspondientes a las mediciones de temperatura que se realizan a las 08.00 horas.

Las mediciones de temperatura las realizan diferentes operadores; son por lo general cuatro los encargados de la tarea. Se ha pensado como una forma de reducir los diferentes "errores personales" de las mediciones, trabajar con una media de cuatro días. En esta forma se dispone de 91 datos de temperatura por cada año que tienen el mismo error. Se ha denominado M-4 a estos valores.

En la tabla N° 3, se indican los valores medios mensuales de la temperatura superficial a las 08.00 horas, para cada uno de los años considerados, se denomina *M* a estos valores. La media mensual general de la tabla 2, se simboliza por la *X*.

TABLA N° 3.— Temperatura Media Mensual (*M*) en la caleta MONTEMAR. Valores calculados en base a las mediciones a las 08.00 horas.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1959	14,2	14,5	13,5	12,8	11,8	12,1	12,5	11,8	11,4	11,6	12,9	12,9
1960	15,0	15,7	14,3	12,3	12,0	12,0	12,0	11,5	11,5	11,6	12,1	13,6
1961	13,8	14,1	13,3	12,2	12,0	12,5	12,2	12,2	12,3	11,7	11,8	12,7
1962	13,9	14,5	14,2	12,2	12,4	12,3	11,5	11,9	11,4	12,2	13,0	14,2
1963	14,2	15,1	13,9	12,3	12,3	12,2	12,7	12,7	12,8	12,6	13,2	13,0
1964	14,4	13,5	13,4	12,7	12,4	12,9	12,8	11,5	11,4	12,0	12,2	14,3
1965	14,2	13,2	13,4	14,4	12,9	13,3	12,8	12,4	11,9	12,6	13,0	13,7
1966	14,5	13,7	13,1	14,3	12,7	12,9	12,8	11,9	11,5	11,7	12,9	13,3
1967	13,3	13,9	13,7	13,4	13,8	12,9	11,4	10,9	11,0	11,5	12,1	12,4
1968	13,8	13,8	13,9	12,2	12,4	12,6	12,1	11,8	11,9	12,2	13,1	13,4
1969	14,8	13,8	14,0	13,6	13,5	13,4	12,1	11,9	12,2	12,2	12,8	13,6
1970	14,9	14,3	14,6	12,9	13,4	12,5	11,1	11,5	11,8	12,6	13,4	13,4
Media	14,2	14,2	13,7	12,9	12,6	12,6	12,2	11,9	11,7	12,0	12,6	13,4
$\bar{X}$												

En la figura N° 1, se han dibujado, para cada año en particular tres curvas: la obtenida con los 91 valores *M-4*, la curva mensual de las *M*, y la curva media anual en base a los valores *X*. En la figura 2 se han dibujado las variaciones de la *M* para los distintos años.

Puede observarse en las figuras 1 y 2 que las fluctuaciones de los valores particulares respecto a sus respectivas medias son muy amplios e irregulares. Es de importancia desde el punto de vista ecológico, caracterizar estas variaciones térmicas de "alta frecuencia" que se observan a lo largo del año en la figura 1, así también como las de "baja frecuencia" que se presentan de un año al otro como se ve en la figura 2.

A fin de tener un criterio para determinar cuales son las variaciones de la temperatura superficial que por su amplitud pueden tener alguna significación, se ha calculado algunas constantes estadísticas, que están consignadas en la tabla Nº 4.

TABLA Nº 4.— Errores Estándar de la Estima de M-4 y de M respecto a  $\bar{X}$ .

$\bar{X}$	2 ESE de M-4			2 ESE de M
	+	-	+ -	+ -
14,2	1,79	1,75	1,60	0,42
14,2	3,28	1,86	2,40	0,80
13,7	1,60	1,68	1,54	0,28
12,9	2,30	1,04	1,62	1,30
12,6	1,66	0,52	0,90	0,90
12,6	1,20	0,48	0,84	0,90
12,2	1,20	0,80	0,96	0,48
11,9	0,66	0,90	0,64	0,40
11,7	1,00	0,40	0,66	0,50
12,0	0,52	0,64	0,56	0,28
12,6	1,23	1,16	1,18	0,44
13,4	1,78	1,72	1,70	0,30

El error estándar de la estima (ESE) se ha determinado para las M-4 y las M en ambos casos con respecto a la media mensual general  $\bar{X}$  mediante la expresión siguiente:

$$\pm \text{ESE} = \left( \frac{(\sum x_j - \bar{x})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

donde  $x_j$  representa los distintos valores M-4 o M según el caso; la  $\bar{X}$ , es la media del mes. En la figura 3 se ha dibujado la curva media anual en base a los valores de  $\bar{X}$  de cada mes, encerrada por las dos curvas  $\bar{X}+2$  ESE y  $\bar{X}-2$  ESE. Todas las variaciones respecto a la media que están comprendidas entre las dos curvas citadas, pueden ser atribuidas al azar en el 95% de los casos. Solo tienen significación estadística las variaciones

que salen del ámbito delimitado por las curvas. Estas fluctuaciones tienen significado físico en el 95% de los casos, (Ezekiel, 1941, pág. 128 y sig.)

Se han calculado dos ESE, uno en base a los desvíos negativos respecto a  $X$  y otros teniendo en cuenta solamente los desvíos positivos. Como puede verse en la tabla 4, en algunos meses las diferencias entre los (+) ESE y los (-) ESE son relativamente amplias. Ello quiere decir que los desvíos negativos y positivos no tienen igual significación durante el año. Por ejemplo en el mes de febrero, un desvío respecto a la media del mes de  $3,28^{\circ}\text{C}$ , solo puede atribuirse al azar en el 95% de los casos, en cambio un desvío negativo superior (en valor absoluto) a  $2^{\circ}\text{C}$ , solo puede atribuirse al azar en el 5% de los casos.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones estadísticas, se ha definido el término "Anomalía de Temperatura Superficial", para aquellos desvíos respecto a la media del mes que son superiores a  $+ - 2$  ESE, es decir que salen afuera del área limitada por las curvas  $X + 2$  ESE y  $X - 2$  ESE de la figura 3.

Las anomalías determinadas según se acaba de indicar, se han representado en la figura 1, por áreas negras. Comparando estas áreas con las achuradas que indican los desvíos de las curvas M-4 respecto a la curva media anual, se deduce que solo una pequeña porción de los desvíos pueden considerarse como anomalías y por lo tanto se pueden atribuir a algún factor físico.

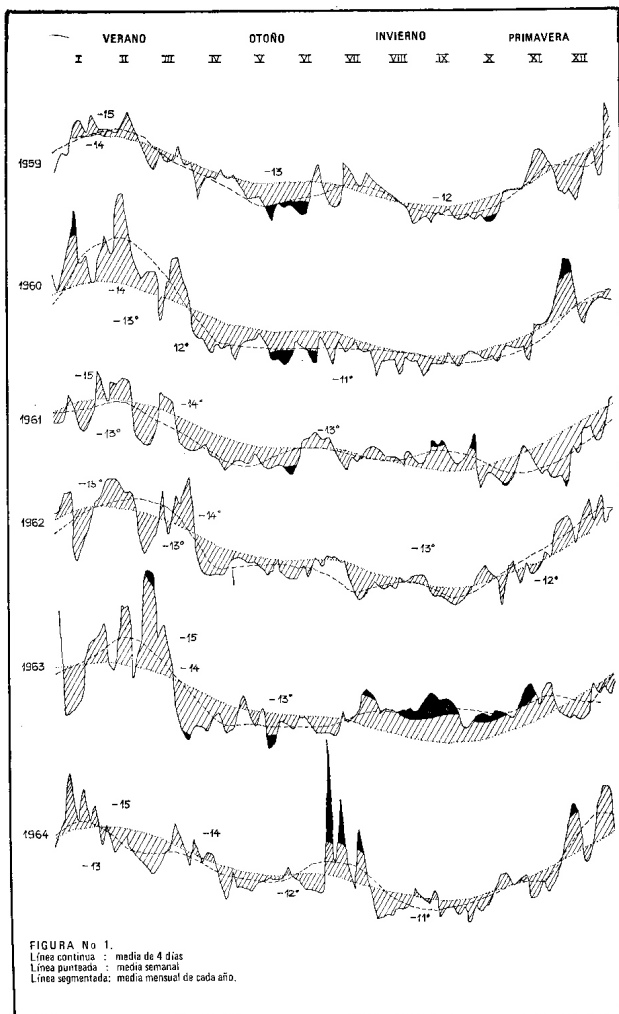
Se han calculado también los ESE para las curvas de las temperaturas medias de cada mes, estos datos figuran también en la tabla n° 4. En la figura 2 se han dibujado dichas curvas y se ha indicado en negro las desviaciones respecto a la media del mes que pueden considerarse como anomalías en el mismo sentido que se indicó más arriba.

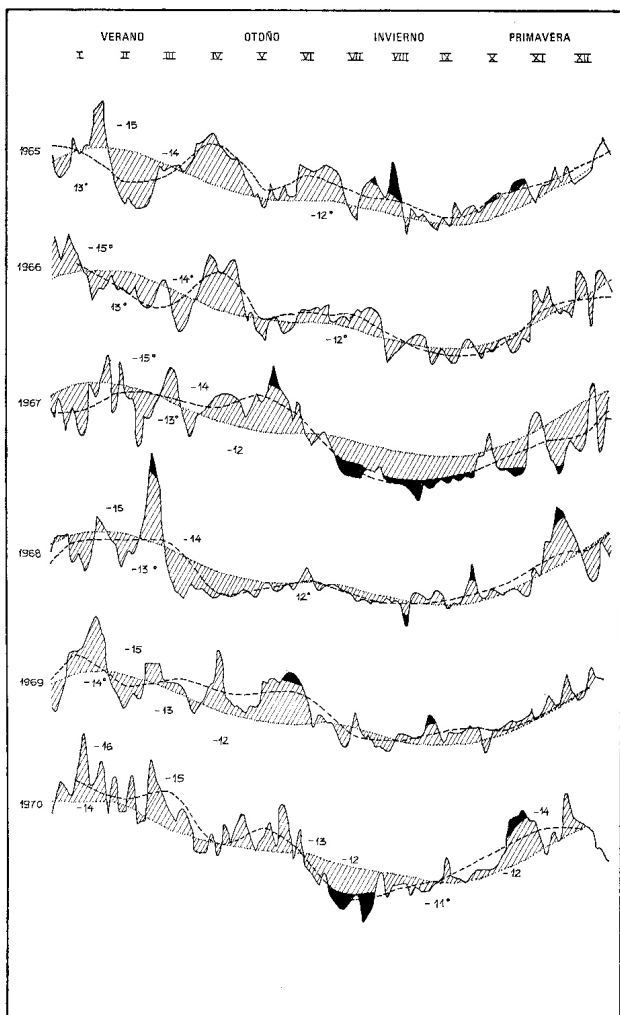
Observando la distribución de áreas negras en la figura 1, se puede notar que éstas se presentan con mayor frecuencia hacia la segunda mitad del año, en la temporada de invierno-primavera. En verano las anomalías de temperatura son raras a pesar de ser la época del año en que se nota una menor estabilidad térmica. Variaciones en M-4 de casi  $2^{\circ}\text{C}$  entre dos medias sucesivas son frecuentes, pero estadísticamente no tienen otra significación que el azar.

El período de invierno-primavera es más estable como lo indica el hecho de presentar valores de ESE mucho menores que los observados durante el verano. Desde mayo a octubre inclusive, los ESE disminuyen a menos de  $1^{\circ}\text{C}$ . El mes más estable es octubre, cuando se considera anomalía a desvíos respecto a la media del mes superiores a  $0,6^{\circ}\text{C}$ .

El hecho de que durante junio y septiembre se encuentren los mínimos ESE negativos significa lo poco frecuente que son en esa época del año variaciones negativas respecto a la media. Los ESE positivos tienen una frecuencia de casi el doble. Ello es índice de que las variaciones positivas son más frecuentes en estos dos meses del año.

Los periodos de tiempo más largos con anomalías de temperatura se han observado en los años 1963 y 1967, en ambos casos durante la segunda mitad del año. En 1963 desde fines de julio hasta principios de noviembre se encuentran anomalías positivas de temperatura superficial que llegan en agosto-septiembre hasta casi  $0,8^{\circ}\text{C}$ , lo cual significa un desvío respecto a media de casi  $2^{\circ}$ . En 1967 las anomalías son negativas, se extienden también desde julio hasta fines de octubre.





Continuación fig. 1.

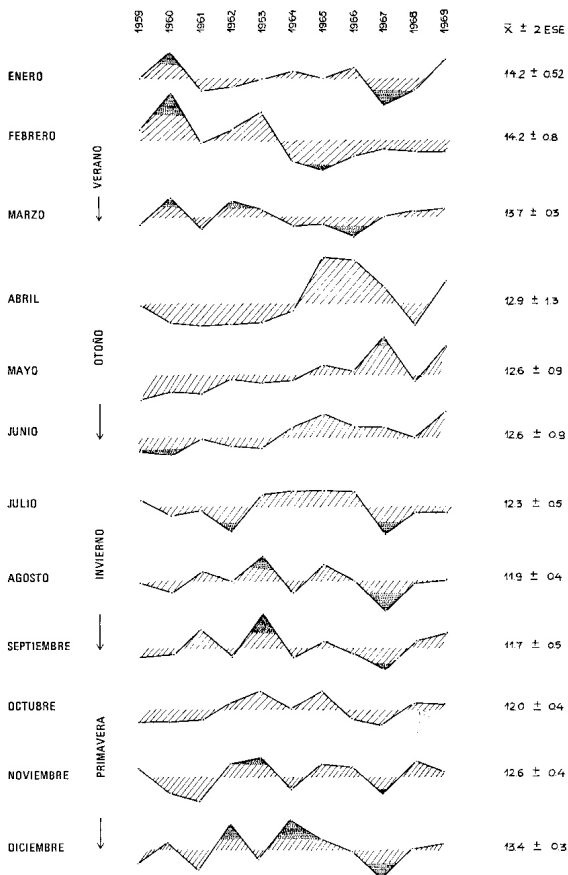


FIGURA No 2.  
Variantes de las medias mensuales de temperatura superficial del mar a través de los años.



Las máximas anomalías en magnitud, se observaron en 1964, entre fines de junio y mitad de julio. El desvío fue de 4,5°C respecto a la media del mes, es decir, una anomalía térmica de 3°C. Es la máxima observada en los 11 años considerados.

No obstante de que las variaciones térmicas no son lo suficientemente amplias como para ser consideradas "anomalías", es posible observar que algunos son más "fríos" que otros dado que la curva M-4 particular se presenta durante más tiempo por debajo de la curva media anual. Pueden considerarse "años fríos" 1961 y 1967, especialmente la segunda mitad de éste último. Otros como 1963 (la segunda mitad) y 1965, hay mayor frecuencia de temperaturas M-4 superiores a la media y podrían considerarse como "años cálidos".

Las consideraciones hechas para las curvas M-4 son válidas también para las curvas *M* de la figura 2. Estas curvas presentan oscilaciones a lo largo de los años analizados pero sin que sea posible detectar alguna regularidad que permita suponer una cierta periodicidad de éstas oscilaciones. Es probable que el número de años considerados no sea suficiente como para poner de manifiesto fenómenos de periodicidad superiores a 4 o 5 años.

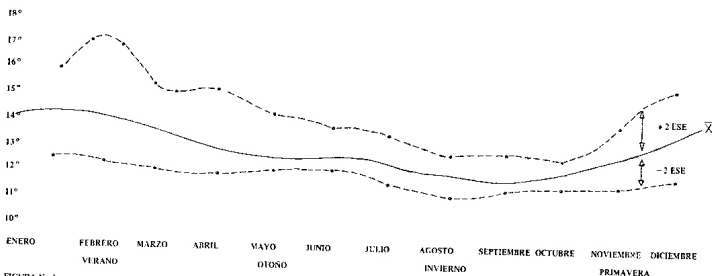


FIGURA No 3.  
Curva media anual (X) y curvas  $\pm 2$  ESE y  $\pm 2$  ESE

### EL SIGNIFICADO DE LAS ANOMALIAS DE TEMPERATURA

Como acabamos de ver las únicas variaciones de temperatura que estadísticamente son susceptibles de ser analizadas son aquellas que se denominan Anomalías de Temperatura Superficial (ATS). Estas variaciones pueden ser atribuidas a algún proceso físico con el 95% de seguridad.

Sólo existen dos mecanismos a los cuales es posible atribuir responsabilidad de la producción de las anomalías tanto positivas como negativas. Un factor es la radiación solar que puede ser en determinadas oportunidades superior o inferior a los valores medios; el otro factor es circulatorio. Ciertas condiciones meteorológicas pueden crear condiciones que permitan la aparición de aguas más cálidas o más frías que las que se presentan normalmente en una determinada época del año.

A fin de tener un criterio en base al cual determinar la influencia de uno u otro factor en la producción de anomalías, se han calculado el coeficiente de correlación entre las anomalías y las variaciones de la radiación (horas de sol). La correlación fue de  $-0,4$ , es decir, muy baja y negativa, y por lo tanto, estadísticamente al menos, no es posible atribuir al factor radiación solar la responsabilidad en la producción de anomalías térmicas. En la figura 2 de Reyes (1965, pág. 178) se nota la falta de relación entre "horas de sol" y la mínima temperatura anual del mar.

En la figura 4 se han dibujado las curvas que indican las medias mensuales de radiación solar incidente, horas efectivas de sol, y la temperatura superficial del mar. Se observa que no existe a primera vista ninguna relación aparente de causa a efecto entre temperatura y radiación solar u horas de sol. Se han analizado otras comparaciones entre los desvíos de las medias mensuales de radiación solar respecto a la media general del mes con los desvíos equivalentes de temperatura superficial sin que tampoco haya sido posible detectar alguna relación aparente entre ambos.

Estos resultados llevan a buscar en los procesos circulatorios la explicación de las anomalías térmicas.

Los vientos del sector sur producen en las costas occidentales de los continentes en el hemisferio sur, el alejamiento de las aguas superficiales, lo que origina la surgencia de las aguas sub-superficiales que por lo general, poseen propiedades físicas y químicas diferentes de las de superficie.

La presencia de aguas sub-superficiales en la superficie debido a la surgencia se puede caracterizar siempre que se conozca la distribución temporal de variables oceanográficas y que exista entre los valores superficiales y los sub-superficiales una diferencia significativa. Esto ocurre generalmente con la temperatura y la concentración de oxígeno y

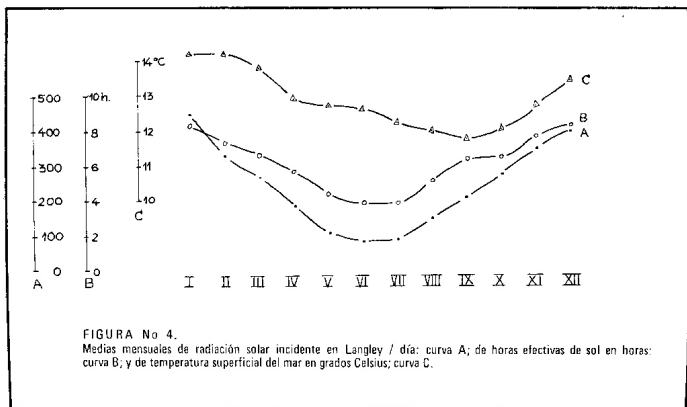


FIGURA No 4.

Medias mensuales de radiación solar incidente en Langley / día; curva A; de horas efectivas de sol en horas; curva B; y de temperatura superficial del mar en grados Celsius; curva C.

nutrientes. La falta de estabilidad o la existencia de gradientes verticales de densidad muy pequeños, son también índices que sumados a condiciones meteorológicas adecuadas pueden indicar afloramientos.

La estabilidad de la capa superficial es alterada por la acción del viento produciéndose la homogeneización de la misma. La estabilidad y el viento del sector SW, en la zona de Valparaíso, son por lo tanto factores opuestos frente al fenómeno de afloramiento. La intensidad de la acción del viento sobre la capa superficial dependerá no solo de la dirección, sino de la intensidad y de la estabilidad de la columna de agua.

Durante el invierno, cuando las aguas superficiales están más frías, la estabilidad es mínima ya que el gradiente de densidad disminuye. En el verano en cambio, al aumentar la temperatura de la capa superficial, se produce un fuerte gradiente térmico (termoclina) que dificulta la homogeneización. Es de esperar, por consiguiente, que en invierno o cuando la temperatura del mar es mínima, se produzcan afloramientos con vientos menos intensos que aquellos necesarios para producir un fenómeno de la misma magnitud en el verano, o época de máxima temperatura superficial. Es necesario, por lo tanto, tener en cuenta la intensidad, frecuencia y dirección del viento en relación con las variaciones de temperatura superficial a fin de poder deducir una relación entre ambos.

En la Tabla N° 5, se han anotado las frecuencias medias con que se presentan los vientos y las "calmas" en la zona de Valparaíso.

Analizando la tabla 5 se puede deducir que la bahía de Valparaíso está sujeta a un régimen de vientos muy constantes, ya que la probabilidad de "calmas" en los 7 años considerados es sólo del 18%. Los vientos más frecuentes son los del sector Sur con una probabilidad media de ocurrencia superior al 50%. Los vientos del cuadrante SW son los predominantes. La frecuencia de los del sector norte es similar a la de calma.

Los vientos del SW no tienen la misma probabilidad de ocurrencia en los distintos meses del año como puede apreciarse en la tabla 6. Allí se han colocado los valores medios mensuales de frecuencia y fuerza de los vientos del SW y de la "calma" para los años 1960 a 1969. Al pie de la tabla se indican los valores medios para cada mes. Las "frecuencias" en la tabla 6 se indican como el número de veces que se ha observado el viento o la calma durante el mes a razón de tres observaciones diarias. Las frecuencias medias para cada mes al pie de la tabla están además expresadas en por ciento. La fuerza en todos los casos está indicada en nudos (millas/hora: 1.8 km/hora).

TABLA N° 5.— Promedios de los años 1963 a 1969 de la frecuencia (V) y fuerza (F) de los vientos observados en Punta Angeles (Valparaíso). Calculado a partir de datos del Anuario Meteorológico de Chile.

Características medias	Dirección del viento								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	O-O
Frecuencia %	6	8	5	9	6	41	5	2	18
Fuerza nudos	6	4	4	4	5	10	6	5	—

TABLA Nº 6.— Valores medios mensuales de frecuencia (V) y fuerza de vientos del sector SW (F); frecuencias de "calmas" (C). Medias de los 10 años en número de observaciones y en porcentajes (%); datos para vientos no-SW. Anuario Meteorológico de Chile, datos de Punta Angeles (Valparaíso).

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1960	V	47	48	40	25	16	21	3	34	30	—	—	43
	F	8	7	7	6	8	5	3	6	7	—	—	11
	C	28	28	37	32	39	34	46	37	42	—	—	27
1961	V	—	50	55	26	18	5	6	13	31	34	38	30
	F	—	12	6	8	5	7	7	5	9	8	9	8
	C	—	23	38	46	53	34	49	39	33	32	30	28
1962	V	38	40	25	31	23	15	21	26	40	47	47	49
	F	10	7	8	8	5	4	6	5	8	9	7	8
	C	19	23	36	39	48	37	47	45	37	33	31	29
1963	V	52	36	40	36	16	18	7	15	23	37	44	52
	F	11	7	9	8	6	6	8	6	9	8	10	10
	C	28	27	24	38	47	33	25	27	18	36	25	19
1964	V	42	40	33	29	24	17	36	38	42	43	46	46
	F	8	10	8	7	4	4	5	5	7	7	9	7
	C	13	25	28	10	22	18	13	7	14	14	7	17
1965	V	43	55	39	34	32	15	18	21	24	36	64	47
	F	7	10	7	5	6	5	5	9	10	8	7	10
	C	12	15	25	27	20	14	8	5	18	9	3	1
1966	V	52	36	40	36	33	11	21	34	42	52	52	63
	F	10	8	8	5	6	5	7	6	7	8	9	8
	C	3	8	15	12	17	4	7	9	21	8	5	6
1967	V	65	44	37	24	27	32	32	29	44	45	61	37
	F	8	8	5	4	6	11	10	14	13	14	14	19
	C	7	14	26	17	19	12	8	18	11	12	6	11
1968	V	46	42	47	35	23	27	23	36	44	65	39	54
	F	14	17	15	8	9	10	10	12	12	17	19	20
	C	12	16	14	14	17	10	18	18	17	17	27	19
1969	V	44	48	42	31	26	18	23	40	45	50	46	55
	F	16	18	15	13	10	11	14	12	17	18	19	14
	C	15	23	19	22	23	21	29	25	21	21	19	17
M E D I A	V%	52	57	44	33	26	20	20	31	41	48	55	48
	F	48	48	41	30	26	18	19	29	37	45	49	52
	C%	10	11	9	7	7	7	7	8	10	11	11	12
	C	16	24	28	29	33	24	28	25	26	22	18	17
	no-SW%	15	20	26	26	31	22	26	23	23	20	17	18
	no-SW	30	19	28	38	41	56	52	44	33	30	27	28
S		30	20	26	34	38	50	49	41	30	28	24	30

Los vientos del SW son más probables en los meses de verano, enero y febrero, cuando la frecuencia es de 52 y 57% respectivamente. Disminuyen durante el otoño hasta alcanzar la mínima frecuencia a comienzos de invierno, junio y julio, para comenzar bruscamente a aumentar la frecuencia de ocurrencia a partir de agosto. Las frecuencias de "calma" en el año varían entre 16 y 33%; el mes de enero es el más ventoso y el más calmo es mayo. Los vientos *no-SW*, son en un 62% vientos del sector N y W que pueden contribuir a afectar la temperatura superficial por aporte de aguas oceánicas sobre la costa.

En la figura 5 se han dibujado las curvas de las frecuencias medias mensuales de los vientos del SW, "calmas" y vientos del *no-SW* (en escala inversa). Se ha dibujado también la curva media anual de temperatura superficial. Analizando esas curvas es posible deducir algunas consideraciones generales respecto a la distribución de temperatura en relación con los vientos dominantes.

El fuerte aumento de la frecuencia de los vientos del *no-SW* que se observa desde febrero a junio, tiende a evitar que la temperatura superficial del mar descienda siguiendo el proceso normal de enfriamiento, manteniendo las temperaturas medias de mayo, junio y julio, algo superior que lo que podría esperarse siguiendo la curva de enero a abril. Es decir, que los vientos *no-SW*, principalmente del sector Norte tendrían como resultado el retardo del enfriamiento de las aguas superficiales. Desde agosto en adelante se produce un brusco aumento de la frecuencia de los vientos del SW. Esto parece estar asociado al retardo en el ca-

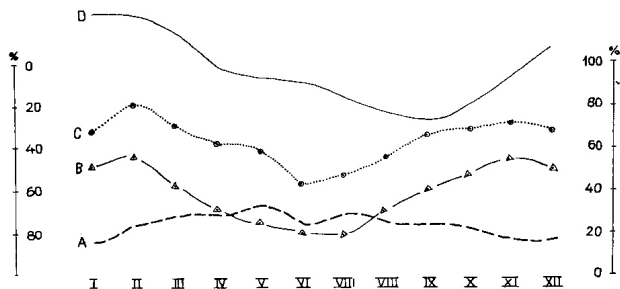


FIGURA No 5.

Medias mensuales de frecuencia de "calma": curva A.  
 Media mensual de frecuencia de vientos de SW: curva B.  
 Media mensual de frecuencia de vientos del *no-SW*: curva C.  
 Media anual de temperatura superficial: curva D.

lentamiento de las aguas superficiales, haciendo aparecer el mínimo anual de temperatura en el mes de septiembre. Los vientos de este sector son relativamente fuertes, (fuerza media 10 nudos) y produciendo afloramientos de aguas sub-superficiales frías con suficiente intensidad como para provocar un descenso de la temperatura media.

Es interesante hacer notar que los vientos en la zona de la bahía de Valparaíso producen un desfase de dos meses de la onda sinusoidal normal, como puede observarse en la figura 5. La línea punteada que continúa la curva media anual después de mayo, es la curva que se presenta desde agosto en adelante, desplazada hacia la izquierda.

Los vientos del SW tienen además un efecto muy importante sobre las poblaciones fitoplanctónicas, pues además de producir una homogeneización de la columna de agua, aportando nutrientes a la superficie, limpia el cielo de nubes, permitiendo así una mayor disponibilidad de radiación solar en la superficie. Es probable que estos hechos sean el origen de la floración ("bloom") primaveral que presenta el fitoplancton (Avaria, 1965) de la bahía. La mantención de estas condiciones de alta producción a través de los meses de verano se debe al efecto homogeneizador de los vientos de SW.

Ya se ha visto que desde el punto de vista estadístico sólo las ATS pueden atribuirse a factores físicos con un cierto margen de seguridad. A fin de analizar los posibles factores que dan origen a estas anomalías, se ha preparado la Tabla Nº 7, en la cual se anotan, para las cuatro estaciones del año, los desvíos respecto a los valores medios de frecuencia de vientos del SW, no-SW, de "calma" y de la fuerza de los vientos del SW.

TABLA Nº 7.— Desvíos respecto a los valores medios de las frecuencias de vientos del SW, no-SW, y de "calma" (C), y de la fuerza de los vientos del SW (F), en cada estación del año.

AÑO	VERANO				OTOÑO				INVIERNO				PRIMAVERA			
	SW	F	C	no-SW	SW	F	C	no-SW	SW	F	C	no-SW	SW	F	C	no-SW
1960	-1	-3	14	-13	-4	-1	5	-1	-6	-3	16	10	-4	0	9	-5
1961	6	-1	10	-16	-7	0	14	-7	-10	-1	15	-5	-13	-3	-12	1
1962	-12	-2	6	6	-1	-1	-11	-10	1	-2	18	-19	0	-3	13	-13
1963	-1	-1	6	-5	-4	0	6	-2	-13	-1	-2	15	-3	-2	9	-6
1964	-8	-1	2	6	-1	-2	-13	10	9	-3	-14	3	-2	-4	-5	7
1965	0	-2	-3	3	3	-2	-10	7	-7	0	-15	22	2	-3	-14	12
1966	-3	-1	-11	14	3	-2	-19	16	4	-1	-13	9	9	-3	-12	3
1967	3	-3	-4	1	4	0	-14	10	7	4	-13	6	1	5	-8	7
1968	-1	5	-6	7	4	2	-17	13	6	3	-4	-2	6	8	3	-9
1969	-1	6	-1	2	1	4	-8	7	8	6	0	-8	3	6	1	-4
MEDIA	46	10	20	24	24	7	30	37	28	8	25	39	47	11	18	27

Observando la figura 1 puede notarse la amplia ATS (-) del invierno y parte de la primavera de 1967 que coincide con un fuerte incremento de la frecuencia de los vientos del SW y de la fuerza media de los mismos. Las pequeñas ATS (-) que se anotan en otoño de 1959, 1960, 1961 y 1963 no aparecen muy claramente asociados a incrementos notables en la frecuencia o fuerza de los vientos del sector SW. Pero si se observan las curvas *M* y *M-4* de la figura 1, se puede notar que estas pequeñas anomalías están siempre precedidas por periodos relativamente largos de temperaturas menores que la normal. Ello indica poca estabilidad de la columna de agua y por lo tanto es de esperar que en esas condiciones, vientos del SW normales puedan producir afloramientos como para dar origen a pequeñas anomalías térmicas.

Observando ahora las ATS (+), especialmente la del invierno y primavera de 1963, coincide con un gran aumento de la frecuencia de vientos del sector *no-SW*, a costa de una gran disminución de los vientos del Oeste. En primavera en cambio, es la frecuencia de calma la que se ha incrementado a costa de los vientos de ambos sectores. Las anomalías observadas a fines de junio y principios de julio de 1964, sólo notable en las "medias de cuatro días", constituyen condiciones excepcionales, probablemente producidas por una "invasión" de aguas oceánicas por fuerte viento norte. En todo caso es un fenómeno único, (*temperatura de 17°C en junio*) en los 12 años considerados. Las dos ATS (+) de 1960, en verano y primavera, pueden vincularse a aumentos de la calma en los mismos periodos. En invierno de 1965, una ATS (+) relativamente importante puede asociarse a un fuerte aumento de la frecuencia de los *no-SW*.

En general si se observan las curvas *M* para cada año en la figura 1 en relación con los datos anotados en la Tabla N° 7, se puede notar una buena correspondencia entre la posición de la curva *M* con respecto a la *curva media anual* y las características de los vientos en las mismas épocas.

Es indudable que es posible atribuir a los vientos dominantes la responsabilidad de las anomalías térmicas en las aguas superficiales de la bahía de Valparaíso. Aunque no se tiene el apoyo estadístico necesario como para concluir en forma definitiva sobre la responsabilidad que le cabe a cada viento en los cambios de temperatura superficial, es posible sostener la hipótesis de que los vientos del sector SW son los responsables de las anomalías negativas (ATS -); es dable esperar aumentos de temperatura superficial cuando se producen periodos de calma o aumentos de las frecuencias de los vientos de los sectores *no-SW* (N y NW principalmente).

El mecanismo a través del cual el viento SW produce bajas temperaturas es indudablemente el "*upwelling*", pero los que dan origen a las ATS (+) no son tan claros. Es posible que los periodos de calma permitan una mejor insolación, especialmente en verano. Los vientos del sector N y NW podrían aportar aguas superficiales oceánicas que por lo general son más cálidas que las costeras.

## LA RADIACION SOLAR

La radiación solar es la fuente primaria de casi toda la energía que es esencial para el mantenimiento de la vida vegetal y animal de la Tierra así también como para generar la mayoría de los fenómenos naturales que tienen lugar en la superficie del planeta.

La energía radiada al espacio por el Sol tiene su máximo a una longitud de onda de 0,47 micrones con una salida de 8kw/m<sup>2</sup>. La energía radiante medida sobre una superficie perpendicular a los rayos solares en el límite de la atmósfera, a media distancia entre el Sol y la Tierra se denomina *Constante Solar* y, es igual aproximadamente, a 2 cal. cm.<sup>-2</sup>. min<sup>-1</sup>.

Tanto la calidad como la cantidad de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, varía con el lugar y la época del año. Estos cambios son producidos por los gases y las partículas en la atmósfera. De éstos factores indudablemente los más importantes son la absorción y reflexión producida por las nubes.

Los valores estimados sobre la cantidad de energía solar que llega a

TABLA Nº 8.— Medias mensuales de "Horas de Sol" (HS) registradas en Montemar y Energía Radiante (E) en Langley/día deducida a partir de HS.

MES	1959	1960	1961	1962	1963	1966	1967	1968	1969	MEDIA
ENE	HS 7,1	8,5	9,2	7,5	9,9	7,6	9,9	8,5	8,2	7,6
	E 340,8	408,0	441,6	360,0	475	365	475	408	394	450
FEB	HS 6,7	8,5	8,3	4,8	7,4	6,0	8,1	8,8	7,8	7,3
	E 302	383	374	216	333	270	365	396	351	
MAR	HS 7,6	7,9	4,6	5,5	8,6	7,5	3,6	8,2	6,8	6,7
	E 304	316	184	220	344	3000	144	328	272	268
ABR	HS 5,2	5,5	4,9	7,4	5,0	5,5	4,9	4,6	6,8	5,5
	E 170	180	160	242	164	180	160	150	222	184
MAY	HS 3,6	4,2	3,2	4,5	5,1	4,8	4,0	4,6	3,5	4,2
	E 91	106	81	113	129	121	101	116	88	105
JUN	HS	2,1	4,8	3,9	2,2	2,5	6,8	3,7	4,4	3,8
	E	45	102	83	47	53	144	78	93	81
JUL	HS 2,3	4,7	3,7	4,6	2,4	4,3	4,5	3,1	4,2	3,7
	E 51	103	81	101	53	95	99	68	92	83
AGO	HS 6,2	4,6	4,2	5,2	2,5	7,0	6,5	5,5	6,0	5,3
	E 174	129	118	146	70	196	182	154	64	137
SEP	HS 6,2	6,7	5,4	7,2	5,3	5,4	6,3	6,1	7,2	6,2
	E 202	218	176	234	172	176	205	198	234	202
OCT	HS 6,3	5,5	6,2	4,7	7,3	7,6	7,0	6,0	7,7	6,5
	E 259	226	255	193	300	312	288	245	317	265
NOV	HS 7,3	7,9	7,6	7,5	7,9	8,1	6,7	7,5	8,2	7,6
	E 332	360	346	341	360	369	305	341	373	347
DIC	HS 7,6	8,0	7,8	8,7	7,5	9,9	7,4	9,7	8,4	8,3
	E 360	379	370	412	356	469	351	460	398	395



la tierra, son variables, dependiendo de la forma en que fueron efectuadas las mediciones. Se considera que un 65% de la radiación incidente llega a la superficie terrestre. En días despejados este valor puede aumentar hasta un 80% o más (cuando el sol brilla entre nubes dispersas, Holmes, 1957), pero disminuye hasta 20% o menos en días nublados y lluviosos. La insolación recibida a través de varios tipos de nubes es la siguiente: *cirrus*, 83%; *cirrus-stratus*, 78%; *alto cúmulos*, 49%; *alto-stratus*, 41%; *strato-cumulus*, 32%; *stratus*, 25%; *nimbus stratus*, 20%; *niebla*, 18%. Los porcentajes son respecto a la radiación que llega con cielo despejado.

El profesor Kimball realizó entre 1920 y 1930, una serie de estudios sobre la distribución de la radiación solar en distintas regiones del planeta. Evaluó las medidas diarias para cada uno de los días del mes en 24 estaciones situadas en otras tantas regiones de la Tierra. Los valores consideran cielo sin nubes y el contenido de humedad atmosférica característico de las áreas estudiadas. Estos datos fueron usados por Sverdrup *et al.* (1942), para calcular las cantidades medias de energía que incide sobre el mar en diferentes localidades en los distintos meses del año.

En el área de la bahía de Valparaíso existe una estación de registro de la radiación solar incidente en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María. El observatorio está situado en Lat. 33°02'S y Long. 71°40'W a unos 60 metros sobre el nivel del mar. Sus datos pueden aproximadamente considerarse como correspondientes a la radiación incidente en la superficie del mar. En el Departamento de Oceanología de la Universidad de Chile se lleva un registro de "horas de sol" desde 1959 (Reyes, 1960), y a partir de 1970 un registro de radiación solar.

Considerando la radiación diaria sobre superficie horizontal promedio para días sin nubosidad y la duración teórica del día (datos de 1963 facilitados por Dr. Hirschman), se ha calculado el valor medio que tiene la hora de sol en Langley/minuto, para cada mes. Con este valor y los registros de "horas de sol" se ha hecho una evaluación media de la radiación solar para cada uno de los meses de los años para los cuales se disponía de información. En la Tabla N° 8, se indican estos valores y las "horas efectivas de sol" medias por mes. Se analizaron estadísticamente los desvíos de los promedios mensuales de radiación solar de cada mes y año particular con respecto a la media general mensual. Los resultados indican que los desvíos no tienen significación estadística y pueden atribuírselos al azar en el 95% de los casos; es decir, no existen "anomalías de radiación solar" en el mismo sentido que fueron definidas para la temperatura superficial del mar.

La radiación promedio mensual máxima, ocurre en el mes de enero con 450 ly/día; la mínima se produce en el mes de junio con una media de 81 ly/día, y 3,8 "horas de sol". En los años 1963 y 1967 se observaron máximas radiaciones en el mes de enero; en ambos casos se calculó 475 ly/día. La mínima radiación observada en ese mes fue 340 ly/día de promedio mensual en el año 1959.

La radiación solar promedio mensual mínima fue observada en junio del año 1960, con 45 ly/día y 2,1 "horas de sol" promedio. El mes de junio más asoleado fue el del año 1967, oportunidad en que se registraron 6,8 "horas de sol" promedio, lo que da una energía media diaria de 144 ly/día.

En la figura 6, se han dibujado las medias mensuales para cada uno de los años analizados. Es interesante hacer notar la falta de correlación entre la radiación solar y la temperatura media de la superficie del mar, (figura 1). 1963 presenta como ya se vió, fuertes anomalías positivas de temperatura en la segunda mitad del año; sin embargo en lo que a radiación solar se refiere, es un año "frío". Una relación también inversa se observa en el año 1967, el que presentó las mayores anomalías térmicas negativas en la segunda mitad del año. La radiación solar recibida en esa oportunidad es no obstante más alta que la media para esa temporada.

Estos hechos aparentemente contradictorios, están en acuerdo con las características meteorológicas de la zona. Como ya se vió, en los meses de primavera se produce por lo general un aumento de la frecuencia de los vientos del SW, los cuales además de producir afloramientos, limpian el cielo de nubes, lo que produce una baja de temperatura en la superficie del mar por una parte y un aumento de la radiación solar al aumentar las horas del sol. Los años 1963 y 1967 presentan un comportamiento opuesto en cuanto a la influencia de los vientos del SW. En 1963 aquella fue menor que la normal y en 1967 fue mayor que la normal. Los vientos del sector N y NW, producen por lo general nubes y aportan aguas más templadas y los del SW un efecto totalmente opuesto.

Desde el punto de vista de la ecología del fitoplancton, importa analizar los factores que afectan penetración de la luz en el mar.

Solo una parte de la radiación que llega a la superficie penetra en el mar. Hay pérdidas por dispersión producida por las partículas cerca de la superficie y por un mecanismo asociado al estado superficial del mar (Holmes, *op. cit.*).

Las pérdidas de luz por reflexión dependen del ángulo de incidencia de los rayos solares. En la tabla Nº 9, se indican los porcentajes de la radiación solar incidente que es reflejada por la superficie del mar en función de la altura del Sol sobre el horizonte.

El ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie del mar depende de la época del año y de la hora del día. Aumenta desde la salida del sol hasta alcanzar un máximo cuando el sol pasa por el meridiano del lugar; luego nuevamente disminuye hasta la entrada del sol. El ángulo máximo de incidencia ocurre en el solsticio de verano, el 22 de diciembre en el Hemisferio Sur y el mínimo se produce en el solsticio de invierno que tiene lugar el 21 de junio.

TABLA Nº 9.— Porcentaje de la radiación total que es reflejada por una superficie horizontal de agua a diferentes altitudes del sol. (Holmes, 1957, pág. 114).

Altura del Sol (°)	10	20	30	40	50	60-90
Porcentaje reflejado	28	14	8	6	5	4

La máxima altura que alcanza el sol a medio día, cualquier día del año, se puede determinar conociendo la latitud del lugar y la declinación del sol para ese día en particular.

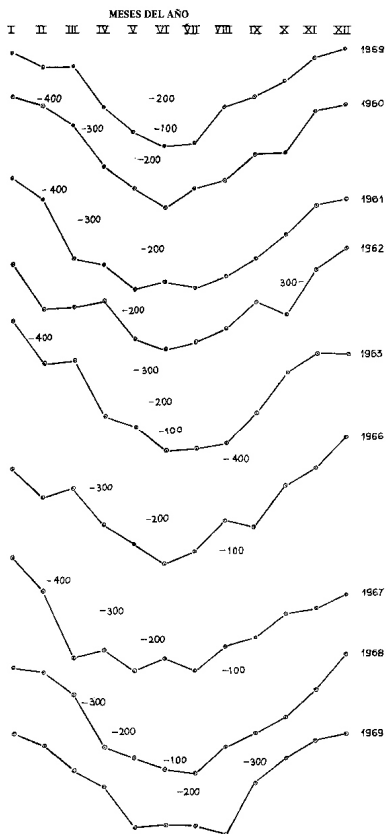


FIGURA No 6.-

Curvas de la distribución anual de radiación solar incidente en Langley/día.-  
Valores calculados a partir de datos de " horas de sol " .

Si  $Dz$  es el ángulo complementario de la altura del sol y  $Dc$  la declinación del sol para un día determinado (Almanaque Náutico) la máxima altura del sol sobre el horizonte ( $A$ ) está dado por la expresión siguiente:

$$A = 90^\circ - \text{Latitud} + Dc$$

ya que

$$\text{Latitud} = Dz + Dc$$

$$Dz = 90^\circ - A$$

y

Para Valparaíso con una latitud sur de  $33^\circ 02'$ , la máxima altura del sol a medio día del año se puede calcular con la expresión siguiente:

$$A = 46^\circ 58' - \text{Declinación} (1)$$

La declinación del sol se obtiene de los almanaques náuticos teniendo en cuenta que la declinación sur es positiva y la norte negativa en la fórmula (1). El 22 de diciembre la declinación sur es máxima,  $23^\circ 26,5'S$ , lo que significa que la máxima altura que alcanza el sol al pasar el meridiano del lugar en Valparaíso es  $70^\circ 24,5'$ . Durante el solsticio de invierno, cuando el sol alcanza la máxima declinación norte, la mínima altura del sol a medio día en Valparaíso es de  $23^\circ 30,5'$ , esto ocurre el 22 de junio, el día más corto del año.

En dos oportunidades al año la declinación solar es nula, por lo tanto la altura del sol al pasar el meridiano es igual al complemento del lugar, es decir, en Valparaíso es  $46^\circ 58'$ . Esto se produce en los equinoccios de verano e invierno.

La altura de sol que se determinan con la fórmula (1) corresponden a mediodía solar; el resto del día las alturas son naturalmente inferiores. Interesa conocer para las distintas épocas del año, entre que "horas del día el ángulo de incidencia del sol alcanza valores que permitan una penetración significativa de energía radiante al mar. La variación del ángulo de incidencia de los rayos solares durante el día, en cualquier día del año, puede representarse por una función seno:

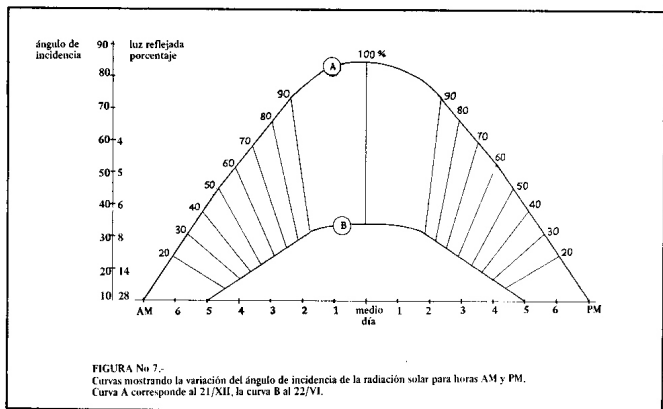
$$\text{Angulo de incidencia} = A \text{ sen } wt$$

donde  $A$  es la altura máxima de-

terminada según la fórmula (1),  $w = 2 \text{ Pi}/T$ ; siendo  $T$  el período de la onda sinusoidal, es decir dos veces el número de horas que transcurren entre la salida y puesta del sol.

Se ha calculado la variación del ángulo de incidencia durante el día para el 22/XII cuando  $A = 70^\circ 26'$ . Las horas entre salida y puesta del sol son 14, es decir, que  $T=28$ . Haciendo  $t=X - 06.00$  donde  $X$  es cualquier hora del día y 06.00 la hora de salida del sol, y dando valores  $X$ , se ha construido la curva "a" de la figura Nº 7, que representa la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares durante el día. Procediendo en forma idéntica pero teniendo en cuenta el valor de  $A$  para el día 21/VI, se han calculado los valores de la curva "b" de la misma figura. Ambas curvas representan por lo tanto condiciones límites en el año. La curva que represente la variación del ángulo de incidencia del sol para cualquier otro día del año estará comprendida entre las dos curvas de la figura Nº 7.

Las rectas simétricas que unen dos puntos de las curvas "a" y "b", limitan las horas alrededor del medio día entre las cuales el ángulo de



incidencia de los rayos solares es superior al porcentaje del ángulo máximo indicado sobre la curva "a". Mediante las curvas de la figura N° 7, es posible determinar rápidamente entre qué horas alrededor del medio día el sol estará por encima de una determinada altura. Un ejemplo ilustrará sobre el uso del gráfico. Se desea saber entre qué horas el ángulo de incidencia del sol será superior a  $30^\circ$  el día 18 de septiembre. El almanaque náutico indica una declinación de  $2^\circ 09' N$  para ese día. La altura máxima en Valparaíso será por lo tanto de  $44^\circ 48'$  (o sea  $44,81^\circ$ ). El ángulo de  $30^\circ$  es algo inferior al 70% del ángulo máximo. Tomando el valor de  $30^\circ$  en absisa y las líneas de 70% que unen las curvas "a" y "b", quedan determinadas las horas AM y PM entre las cuales el sol estará sobre  $30^\circ$  en el horizonte.

De la Tabla N° 9 y de la figura N° 7, se puede deducir que las pérdidas de energía radiante debido a la reflexión en la superficie del mar son importantes, mayores del 30% cuando los ángulos de incidencia son menores de  $10^\circ$ ; ésto ocurre dentro de las dos horas anteriores a la puesta o posteriores a la salida del sol. En cambio las pérdidas de energía radiante debidas o vinculadas al estado de la superficie del mar, pueden ser mucho más importantes que las debidas simplemente a la reflexión. Estas pérdidas pueden llegar a ser del orden del 30% o más con vientos de moderados a fuertes.

En base a las frecuencias de las "calmas" y fuerza media de los vientos en el área de Valparaíso es posible calcular un valor medio de pérdida de radiación solar atribuible al estado de la superficie del mar. De acuerdo con Strickland (1958, p. 464) las pérdidas de luz pueden variar desde algunas unidades por ciento en "calma", pasando a 5-17% con vientos leves (4 a 7 nudos) aumentando a 30% o más con vientos de moderados (13-18 nudos) a fuertes (25-31 nudos).

La fuerza media anual de los vientos del sector SW que son los más fuertes, es de 9 nudos. La media de la temporada de primavera-verano

es de 10 nudos, es decir, que los vientos pueden considerarse como vientos suaves a moderados. Teniendo en cuenta los datos de Strickland es posible considerar una pérdida media de 13 a 15% atribuible al estado de la superficie del mar. Si se tiene en cuenta además la probabilidad de vientos en la zona, de 0,22 se puede establecer para la bahía de Valparaíso un valor medio de pérdida de luz incidente asociado al estado del mar de 11%.

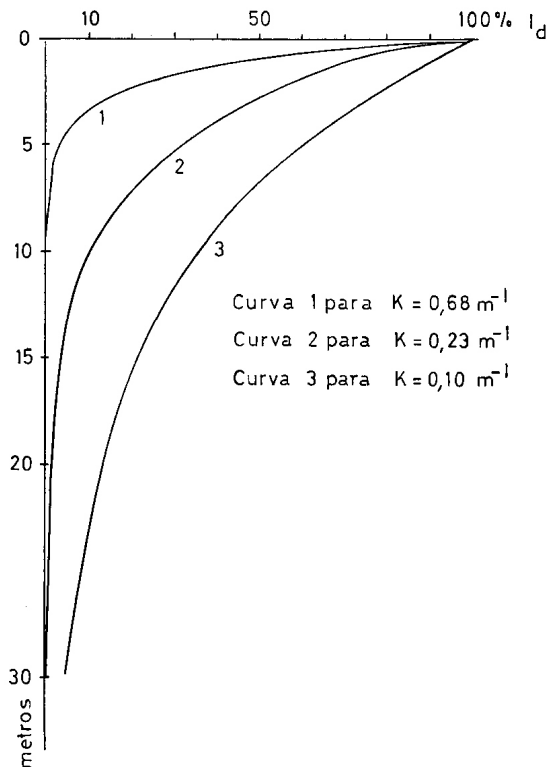


Figura Nº 8.— Curvas indicando la intensidad de la luz que penetra en el mar en función de la profundidad para tres valores de  $k$ . La intensidad de la luz ( $I_d$ ) está expresada en por ciento de la intensidad que llega a la superficie y la profundidad está indicada en metros.

Una vez que la radiación penetra en el mar es atenuada más o menos rápidamente por una serie de fenómenos tales como absorción, dispersión, difusión, etc., que se involucran bajo el término genérico de *absorción*. Una medida de todos estos procesos es el coeficiente de extinción a que puede medirse aproximadamente con el disco de Secchi.

La transparencia del agua depende de muchos factores y está sujeta a una cierta variación estacional resultado del desarrollo de organismos microscópicos, especialmente fitoplanctónicos. Como resultado de numerosas mediciones de transparencia del agua de mar realizadas en la bahía de Valparaíso, mediante el empleo del disco de Secchi, se ha obtenido un valor medio de  $D$  igual a 8,3 metros. El coeficiente de extinción ( $k$ ) calculado a partir de ese valor y mediante la expresión  $k = 1/9D$ , arroja un valor de  $0.23 \text{ m}^{-1}$  para las aguas de la bahía. Teniendo en consideración la tabla IV de Strickland (1958, pág. 475), podría asimilarse esta medida a la de "aguas costeras moderadamente turbias", (pero en forma muy aproximada puesto que la tabla aludida se refiere a coeficientes de extinción determinados para diferentes colores de luz).

En base al valor de  $k$  medio se ha dibujado la curva "media" de la figura 8, que muestra la intensidad de la luz en función de la profundidad. En la misma figura se han incluido además dos curvas dibujadas en base a los valores máximos y mínimos del coeficiente de extinción observado en el área. El máximo valor fue determinado en oportunidad de un fuerte "bloom" de diatomeas cuando se leyó 2,8 metros con el disco de Secchi ( $k = 0.68 \text{ m}^{-1}$ ). El mínimo fue observado durante el invierno cuando la actividad fitoplanctónica está muy reducida; la máxima profundidad con el disco Secchi fue de 19 metros lo cual da un coeficiente  $k = 0,1 \text{ m}^{-1}$  (datos no publicados).

Teniendo en cuenta la distribución de la radiación solar durante el año, las probabilidades de vientos y la transparencia del agua de mar en la bahía de Valparaíso, es posible determinar cuáles son las intensidades de iluminación más adecuadas para las poblaciones fitoplanctónicas presentes en la temporada de primavera-verano en la bahía.

La fotosíntesis es un proceso que depende linealmente de la intensidad de la iluminación entre ciertos límites solamente. Una vez que la intensidad de la energía radiante alcanza cierto valor, la "intensidad de saturación", la fotosíntesis no se incrementa con nuevos aumentos de la intensidad de aquella. Si la intensidad de la radiación luminosa continúa aumentando, puede producirse una disminución de la actividad fotosintética. Esta inhibición del proceso ocurre para ciertos valores de la intensidad luminosa que son característicos de la población fitoplanctónica y de las condiciones de iluminación a las cuales ha estado sometida.

A fin de determinar cuales son los ámbitos de intensidad luminosa para el plancton "medio" de la temporada de primavera-verano en la bahía de Valparaíso, se han preparado la Tabla N° 10 y la figura N° 9. En la Tabla 10 se indican las concentraciones de clorofila "a" y la intensidad de la radiación solar en dos profundidades y en la superficie de una estación fija en la bahía de Valparaíso. Los datos de radiación solar han sido determinados en base a la radiación registrada durante las horas en que tuvo lugar el muestreo, corregidas por las pérdidas asociadas al estado del mar. Para calcular la iluminación subsuperficial se ha tenido en cuenta la medición de transparencia con disco de Secchi.

TABLA Nº 10.— Porcentaje de clorofila "a" e intensidad de la radiación (ly/min) en función de la profundidad. Estación A, en las fechas indicadas.

FECHA	SUPERFICIE		5 METROS		10 METROS	
	Cl "a"	Rad.	Cl "a"	Rad.	Cl "a"	Rad.
27 Oct 1970	92%	0,27	100%	0,07	60%	0,02
3 Nov 1970	22%	0,65	12%	0,20	100%	0,06
10 Nov 1970	100%	0,24	39%	0,06	42%	0,02
24 Nov 1970	100%	0,24	74%	0,01	24%	—
1 Dic 1970	49%	0,32	80%	0,02	100%	0,01
29 Dic 1970	30%	0,65	100%	0,23	86%	0,06
22 Ene 1971	62%	0,60	100%	0,15	41%	0,03
26 Ene 1971	82%	0,24	100%	0,01	29%	—
2 Feb 1971	47%	0,60	70%	0,10	100%	0,01

Los datos de la Tabla 10 han sido graficados en la figura Nº 9, donde las concentraciones de clorofila "a" en función de la radiación han sido expresadas como porcentajes respecto al valor máximo, la curva media ha sido dibujada a "mano alzada".

Del análisis del cuadro y de la figura, se deduce que las concentraciones máximas de clorofila se encuentran con mayor frecuencia a intensidades inferiores a 0,3 ly/min, las concentraciones medias son inferiores a 0,5 ly/min, las concentraciones medias son inferiores al 50% del máximo. La curva media dibujada indica que es posible tomar como valor medio de intensidad de saturación entre 0,08 y 0,09 ly/min; la intensidad media de inhibición puede tomarse entre 0,20 y 0,22 ly/min.

Ryther (1956) dió algunos valores de *Isat* para clorófitas, diatomeas y dinoflagelados. En base a la clorófitas, *Dunaliella euclora*, *Chlamydomonas* sp., *Ptymonas* sp., *Mischococus* sp. y *Nannochloris* sp., fijó la intensidad de saturación media para ese grupo. Con experiencias con *Skeletonema costatum*, *Nitzschia closterium* y una *Navicula* sp., dió para las diatomeas los límites de 0,07 a 0,16 ly/min. Para los dinoflagelados los límites fueron de 0,16 a 0,20 ly/min., determinado en base a experiencias con *Gymnodinium splendens*, *Amphidinium klebi*, *Gyrodinium* sp., y *Eruviella* sp. En mediciones efectuadas en zonas costeras al sur de Long Island sobre plancton natural, Mandelli *et al.*, (1970) encontró el máximo rendimiento fotosintético de la clorofila "a" a intensidades entre 0,12 y 0,30 ly/min (20 a 40 Klux).

En la figura 9 se han indicado también (cruces) los resultados de algunas experiencias efectuadas en enero y febrero de 1971 para determinar la fotosíntesis en función de la luz. Las experiencias fueron realizadas con plancton natural utilizando luz solar como fuente de iluminación y atenuadores adecuados (Escalante y Gore, comunicación personal). La



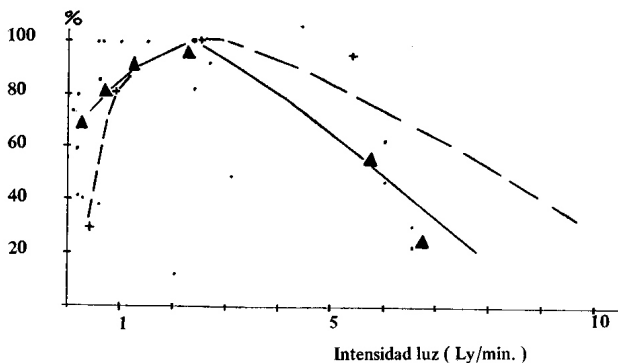


FIGURA No 9.-

Concentración relativa de clorofila "a" en función de la luz ( . ) ;  
valores medios (▲) y curva a "mano alzada".  
Fotosíntesis relativa en función de la luz (+).

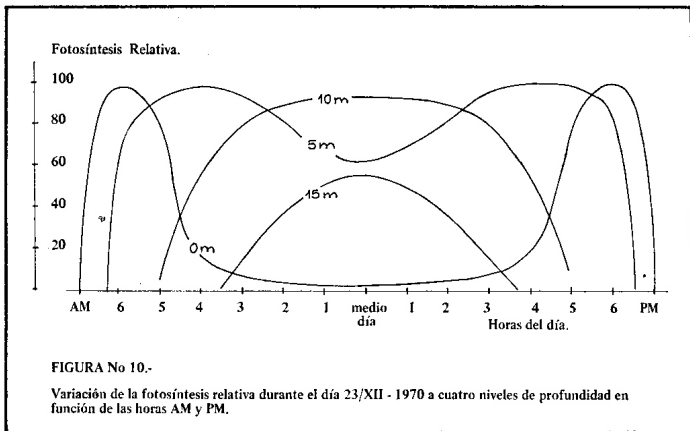
fotosíntesis se mide en base al  $C^{14}$  fijado y los resultados están expresados en porcentaje respecto a la fotosíntesis máxima ( $F_{max}$ ).

Existe una buena correspondencia entre las intensidades de inhibición deducidas en base a la distribución de las concentraciones medias de clorofila "a" en función de la luz y los valores medios deducidos en base a las mediciones de fotosíntesis. Lo mismo puede decirse respecto a los valores citados de Ryther (*op. cit.*) y Mandelli *et al.*, (*op. cit.*). Teniendo en cuenta estos datos se toma como intensidad de inhibición para el fitoplancton "medio" de primavera-verano en la bahía, el valor de 0,25 ly/min.

En base al registro de la radiación solar registrada en Montemar durante el día 23 de diciembre de 1970, se ha calculado la intensidad de la radiación solar en superficie y a las profundidades de 5,10 y 15 metros. Para el cálculo se ha tenido en cuenta, la variación del ángulo de incidencia durante el día, el coeficiente de extinción media y la pérdida asociada al estado superficial. Con la distribución de la energía radiante en función de la profundidad y la curva media de la figura 9 se han calculado las curvas de la figura 10, que muestra la variación de la fotosíntesis relativa durante el día 23/XII/1970 a los niveles de profundidad indicados.

El modelo representado en la figura 10, muestra que en la superficie hay una fuerte inhibición de la fotosíntesis durante casi todo el día,

a 5 metros de profundidad, se produce inhibición (40%) a medio día y la máxima fotosíntesis se produce a 10 metros de profundidad. Si se tienen en cuenta los valores de radiación solar desde octubre a marzo, las condiciones descritas por el modelo de la figura 10, puede considerarse como representativo del comportamiento del fitoplancton durante la temporada de primavera-verano. Se deduce por lo tanto que los niveles de 5 y 10 metros son los que soportan la mayor producción y que desde el punto de vista productivo son más efectivos los días no muy luminosos.



### RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha estudiado la distribución anual de la temperatura superficial del mar en la bahía de Valparaíso con el objeto de aclarar el significado de las variaciones de temperatura.

Los registros de once años de temperatura diarias han sido analizados estadísticamente obteniéndose una "curva media de temperatura superficial". Se ha usado el término "anomalía de temperatura superficial" para las variaciones de temperatura respecto a la curva media, superiores a dos veces el *error estándar de la estima* (ESE). Desde el punto de vista estadístico, solo las anomalías de temperatura pueden ser atribuidos a algún factor físico. Todas las otras fluctuaciones son producidas al azar.

Las anomalías de temperatura superficial negativas están frecuentemente asociadas con los vientos del sud y del sudoeste. La anomalía es debida al afloramiento en la superficie de las aguas sub-superficiales más frías. Los períodos de calma y los vientos del norte están asociados con anomalías positivas pero los mecanismos de la interacción no son claros. Probablemente las aguas superficiales oceánicas son amontonadas sobre las aguas costeras por los vientos del norte.

Al final de agosto o principios de septiembre se produce un brusco aumento de la frecuencia de los vientos del sud lo que tiene una importante influencia sobre el medio marino. El afloramiento de aguas subsuperficiales incrementa la concentración de nutrientes en la capa superficial y al despejar las nubes se incrementa también la radiación solar que llega a la superficie del mar. Estos hechos pueden ser responsables de los "blooms" de primavera.

Se ha analizado la distribución anual de la radiación solar en relación con las anomalías de la temperatura superficial del mar y con las actividades fitoplanctónicas.

La radiación solar ha sido registrada como "horas de sol" durante 10 años; los registros de "horas de sol" fueron transformados en unidades de energía considerando un valor promedio para la energía de la "hora de sol" para cada mes del año. Estadísticamente las fluctuaciones en la cantidad de la energía solar que llega a la superficie del mar no tiene responsabilidad de las anomalías de temperatura o de las variaciones de la temperatura.

Los diferentes factores que influyen la penetración de la luz en el mar han sido analizados. Se ha calculado una distribución media de la radiación solar con la profundidad, considerando condiciones medias de frecuencia de vientos, transparencias del agua, etc. Teniendo en cuenta esta información y datos acerca de las condiciones óptimas de iluminación para la fotosíntesis de las poblaciones costeras de fitoplancton, se han dibujado un conjunto de curvas que muestran la distribución teórica de la fotosíntesis con la profundidad. Las curvas muestran las variaciones de la fotosíntesis durante el 21 de diciembre en la superficie y a niveles de 5 m., 10 m. y 15 m. de profundidad. De acuerdo con el modelo la actividad fitoplanctónica está fuertemente inhibida en la superficie durante la mayor parte del día; al nivel de 5 m. de profundidad hay una pequeña inhibición y la fotosíntesis máxima ocurre al medio día. La contribución del nivel de 15 m. de profundidad a la producción total de toda la columna de agua no es importante, por lo tanto lo fundamental de la producción fitoplanctónica es soportada por los de 5 m. y 10 m. de profundidad. Las curvas pueden ser consideradas como un modelo del comportamiento de las poblaciones fitoplanctónicas medias de la bahía de Valparaíso para cualquier día sin nubes entre octubre y marzo.

#### SUMMARY AND CONCLUSION

The annual distribution of the sea surface temperature of Valparaíso bay has been studied with the aim of disclosing the significance of temperature variations.

Eleven years of daily temperature record has been studied statistically. An annual mean curve of surface sea water temperature has been drawn. The term "surface temperature anomaly" has been used for differences between a particular sea water temperature and the estimated value from the mean curve greater than twice the *standard error of estimate* (ESE). From the statistical point of view, only the temperature anomalies can be explained by a physical factor. All other fluctuations are produced at random.

Negative surface temperature anomalies are frequently associated with and southwest winds. The anomaly is due to the upwelling that brings to the surface the colder subsurface waters. The calm periods and the northern winds are associated with positive anomalies but the mechanisms of the interaction are not clear. Probably the surface ocean waters are piled up over the coastal waters by the northern winds.

The sudden increase of southern wind frequency in late August or beginning of September have important influence on the marine environment. The upwelling of subsurface waters increases the nutrient concentration in the surface layer and as the clouds disperse the solar radiation reaching to sea surface is increased. These facts possibly account for the spring "blooms".

The annual distribution of solar radiation was analyzed in relation to the water anomalies and with the phytoplanktonic activities. The solar radiation was recorded as "sun hours" during ten years; the sun hours record was transformed in energy units considering an average energy value of the "sun hour" for each month of the year.

Statistically the fluctuation in the quantity of solar energy reaching the sea surface has no influence on the temperature anomaly or temperature variations.

The different factors influencing the penetration of light in the sea has been analyzed. Considering average conditions of wind frequency, sea water transparency, etc., a mean distribution of solar radiation with depth has been calculated.

Taking into account this information and the data of the data of the optimum photosynthesis energy requirements of the coastal marine phytoplankton population, a set of curves showing the theoretical distribution of photosynthesis with depth has been drawn. The curves show the variation of the photosynthesis during December 21 th. at surface, 5 m. 10 m. 15 m. depth levels. According to the model the phytoplankton activity is strongly inhibited at surface during most part of the day; at 5 m. depth level there is no inhibition and the maximum photosynthesis occurs at noon. The contribution of the 15 m. depth level to the production of the water column is not important, thus the bulk of the phytoplanktonic production takes place between the 5 and 10 meter depth levels.

The curves may be considered as a model of behaviour of the mean phytoplanktonic population of the Valparaíso bay for any cloudless day between October and March.

#### REFERENCIAS

- AVARIA, SERGIO; 1965. Diatomeas y silicoflagelados de la Bahía de Valparaíso, Rev. Biol. mar., Valparaíso. **12** (1, 2 y 3): 61-119.
- EZEKIEL, MORDECAI; 1941. Methods of Correlation Analysis, 1060 pp., John Wiley & Sons, Inc. Nueva York.
- HOLMES, ROBERT W.; 1957. Solar Radiation, Submarine Daylight and Photosynthesis. Geol. Soc. America, Memoir 67, 1 Chapter 6: 109-128.

- MANDELLI, E., BURKHOLDER, P. R., DOHENY, T. E. y R. BRODY; 1970. Studies of Primary Productivity in coastal waters of southern Long Island, New York. *Marine Biology*, 7(2): 153-160.
- REYES, EDUARDO; 1960. Observaciones Climatológicas en Montemar 1958-1959. *Rev. Biol. mar., Valparaíso*. 10(1, 2 y 3): 155-179.
- — 1965. Valores Climáticos de Montemar. *Rev. Biol. mar., Valparaíso*. 12(1, 2 y 3): 175-183.
- RYTHER, JOHN; 1956. Photosynthesis in the Ocean as a function of Light intensity. *Limnol. and Oceanogr.*, 1: 61-75.
- STRICKLAND, J. D. H.; 1958. Solar Radiation Penetrating in Ocean. A Review of Requirements, data and Methods of measurement with particular reference to Photosynthetic Productivity. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 15(3): 453-493.
- SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W., y R. H. FLEMING; 1952. *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*, 1060 pp., Prentice Hall, Inc. New York.