

UNA EXPRESION SINTETICA DEL REGIMEN ANUAL DEL GRADIENTE TERMICO MEDIO

por ORLANDO PEÑA

Departamento de Geografía de la Sede de Valparaíso de la Universidad de Chile

Concebimos el gradiente térmico como "la diferencia de temperatura que corresponde a una diferencia de altura de 100 metros" (1). Si calculamos dicho gradiente entre dos lugares o estaciones, relativamente cercanas entre sí pero con una cierta desnivelación, a partir de los promedios mensuales de las temperaturas medias, obtendremos doce valores representativos del gradiente térmico medio, considerado mes por mes, con los que podemos determinar el régimen anual de dicho parámetro.

Los trabajos pioneros de A. ANGOT (2) demostraron que el gradiente térmico medio varía según los meses siendo mayor en la primavera y menor en invierno de Europa Occidental. Los procedimientos de cálculo empleados por el autor citado y, sobre todo, la selección de estaciones hicieron que los resultados alcanzados se revelaran, sin embargo, insuficientes y constituyesen, en definitiva, sólo un nivel de referencia para estudios a gran escala. En efecto, en trabajos efectuados por nosotros en torno a las temperaturas de los Alpes Marítimos Franceses (3) hemos determinado valores mensuales del gradiente térmico medio bastante diferentes a los calculados por A. ANGOT, a pesar que la última región mencionada está inscrita dentro de la que se indicó en primer término. Destacan en particular las diferencias entre las curvas construidas con unos o con otros valores: la de Europa Occidental sólo tiene un punto culminante y una depresión; en cambio, la de los Alpes Marítimos Franceses posee

(1) Ch. P. FEGUY: *Précis de Climatologie*, Ed. Masson et Cie.; segunda edición, p. 401; Paris, 1970.

(2) A. ANGOT: *Sur le décroissance de la température de l'air avec la hauteur*; C. R. Ac Ss., cxv, 1892, pp. 1272-1273.

(3) O. PEÑA: *Quelques considérations à propos des températures dans les Alpes Maritimes*; comunicación al X Congreso Internacional de Meteorología Alpina, Grenoble-St.-Martin-d'Herès, 1968; "La Météorologie"... (en prensa).

una doble oscilación (dos máximos —marzo y octubre— y dos mínimos —diciembre y julio/agosto—).

El deseo de resolver los problemas de uso de los valores y de las formulaciones de A. ANGOT ha llevado a una revisión profunda de la noción de gradiente térmico medio y de sus modos de cálculo. Se ha llegado así a generalizar el empleo del "método de regresión lineal" que pone en relación una variable independiente, como las alturas, con una variable dependiente, como las temperaturas, según la fórmula siguiente (4):

$$\gamma = - \frac{\sum (T_i - \bar{T})(Z_i - \bar{Z})}{\sum (Z_i - \bar{Z})^2} \quad \text{y} \quad T_o = \bar{T} + \gamma \bar{Z}$$

donde γ = gradiente térmico.

T_i y Z_i = valores individuales de las temperaturas y las alturas

\bar{T} y \bar{Z} = valores medios de las temperaturas y las alturas

T_o = temperatura al nivel del mar

Cualquiera que sea la alternativa elegida, el cálculo del gradiente térmico medio se hará siempre mes por mes, de acuerdo a lo que hemos denominado la "evaluación vertical" del parámetro en referencia. En oposición o, si se prefiere, como complemento, nosotros proponemos una "evaluación horizontal" que, *grosso modo*, corresponde al estudio de los gradientes térmicos a través del año, utilizando las series de las doce temperaturas medias mensuales para pares de estaciones que presenten una cierta desnivelación (en principio, $\Delta Z \geq 300$ m.) (5).

Nuestra preocupación principal ha sido la búsqueda de una expresión (numérica o gráfica) que pueda indicar la relación existente entre las curvas de las temperaturas medias mensuales de las dos estaciones de cada par y, en consecuencia, permita el cálculo de los gradientes térmicos medios de una manera relativamente rápida y clara.

No se trata, en este caso, de correlación en el sentido estricto del término

(4) Entre los trabajos que han considerado el empleo del método indicado para la determinación del gradiente térmico deben destacarse: a) T. GAZZOLO y M. PINNA: *La distribuzione della temperatura dell'aria in Italia nel trentennio 1926-1955*; publicación N° 21 del Servizio Idrografico (Ministerio dei Lavori Pubblici); Istituto Poligrafico dello Stato; Roma, 1969; b) J. GENTILI: "La temperatura montana in Toscana"; "Revista Geográfica Italiana", annata LXVI, fasc. 4, pp. 309-321; Firenze, 1959, y, en especial, y c) A. DOUGUEDROIT y M. F. de SAINTIGNON: "Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitude moyenne: exemple des Alpes Françaises du Sud"; "Revue de Géographie Alpine", t. LVIII, fasc. 3, pp. 453-472; Grenoble, 1970.

(5) O. PEÑA: *Une expression synthétique du régime annuel du gradient thermique moyen*; "Revue de Géographie Alpine" (en prensas).

(6); el problema es hacer pasar una recta (a) en un plano lo más cerca posible de los doce puntos representativos de las temperaturas medias mensuales de una estación en función de la otra: S_x , la estación más baja, en abscisas, y S_y , la estación más alta, en ordenadas. Para determinar la pendiente de esta recta hemos minimizado la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la recta, distancias tomadas perpendicularmente. Las relaciones obtenidas muestran que la recta pasa por el centro de gravedad T_x , T_y y que su pendiente está dada por la expresión siguiente:

$$a = \frac{\Sigma v^2 - \Sigma u^2 \pm \sqrt{(\Sigma u^2 - \Sigma v^2)^2 + 4(\Sigma uv)^2}}{2 \Sigma uv}$$

donde u y v tienen el mismo significado que en las expresiones propias del estudio de correlaciones, o sea:

$$u = x_i - \bar{x} \quad \text{y} \quad v = y_i - \bar{y} \quad (7)$$

Se constata que la expresión indicada más arriba da dos valores posibles para la pendiente: uno sólo conviene correspondiendo el otro a la recta perpendicular. A título de ejemplo, damos los resultados obtenidos para algunos pares de estaciones de Chile Central (cuadro 2), región de estudio elegida para un análisis más completo de las temperaturas y los regímenes térmicos (8). El valor de esta pendiente nos permitirá caracterizar el comportamiento de cada par de estaciones a lo largo del año y, por lo tanto, las variaciones del gradiente.

La débil dispersión de los puntos T_{x_i} , T_{y_i} en torno a la recta a ha sido probada experimentalmente en nuestros trabajos. En efecto, nunca hemos encontrado puntos muy alejados del eje central: las más grandes desviaciones no sobrepasan casi nunca $0,5^\circ\text{C}$, lo que se comprende fácilmente puesto que la variación de la temperatura a través del año está ligada a fenómenos cósmicos y las correlaciones entre estaciones son siempre muy elevadas.

Cuando la recta de pendiente a corta la recta de pendiente 1, $T_x = T_y$, tenemos hacia lo alto del sistema de coordenadas los puntos correspondientes a los casos de las inversiones térmicas y hacia lo bajo los casos de los gradientes normales. La intersección de las rectas a y $T_x = T_y$ marca sobre el eje de las abscisas un "umbral de inversión" relativos a S_x . Por encima de él las inversiones térmicas entre S_x y S_y son bastante frecuentes mientras que por debajo el

(6) Sobre el empleo de la correlación en los trabajos geográficos, ver: O. PEÑA: *El coeficiente de correlación y las rectas de regresión: su aplicación en Geografía*; "Informaciones Geográficas", Número Único de 1966, pp. 151-155; Santiago, 1969.

(7) En las expresiones indicadas, x_i y y_i corresponden a los valores individuales de cada serie, y \bar{x} y \bar{y} a los promedios respectivos.

(8) O. PEÑA: *Températures et régimes thermiques sur deux littoraux montagnards et leurs arrière-pays: les Alpes Maritimes Françaises et le Chili Central*; Grenoble, 1971.

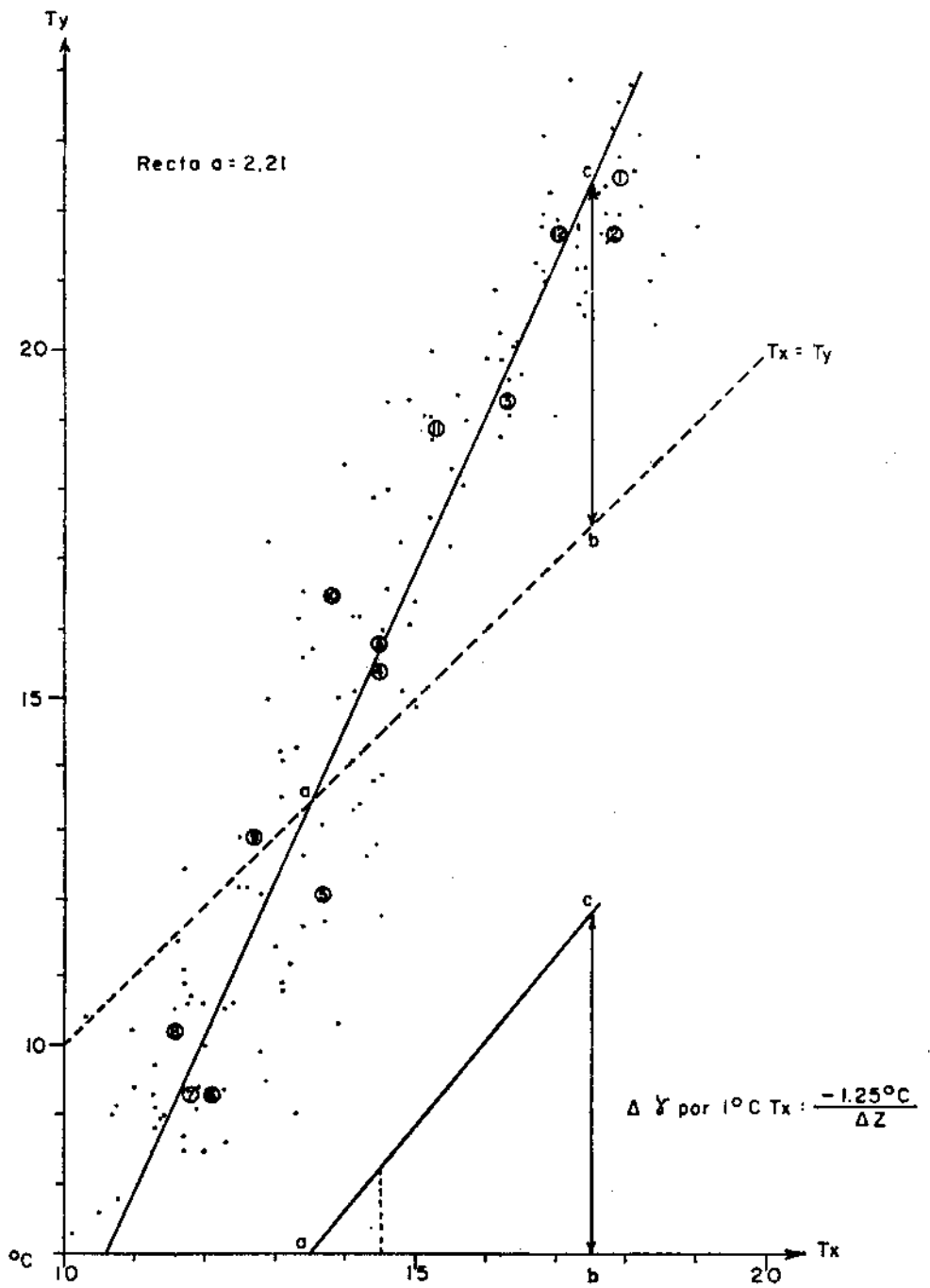


Fig. 1

gradiente es generalmente normal. Es evidente que un "umbral de inversión" relativo a S_y puede también ser determinado según el mismo procedimiento.

La posición relativa de las rectas a y $T_x = T_y$ puede servir, también, a una determinación rápida de los gradientes térmicos entre S_x y S_y a lo largo del año. Se trata solamente de medir la diferencia, expresada, en grados Celsius, entre un punto de la recta $T_x = T_y$ y aquél de la recta a ubicado sobre la misma abscisa o sobre la misma ordenada. La diferencia así determinada se divide por la desnivelación existente entre las dos estaciones, expresada en hectómetros. Las posiciones relativas de los puntos marcados sobre la recta a con respecto a la recta $T_x = T_y$ permitirá establecer si se trata de una inversión térmica o de un gradiente normal lo que se calcula en cada caso partiendo de los principios establecidos anteriormente.

Un ejemplo relativo a un par de estaciones de Chile Central permitirá comprender mejor el procedimiento explicado:

Cuadro N° 1

Valores térmicos medios mensuales de Valparaíso (S_x) y Los Andes (S_y)

(temperaturas medias;		periodo 1940-1951;			$\Delta Z = 775$ metros)		
Valparaíso				Los Andes			Covarianza
M	x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	y_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
E	17,9	3,4	11,56	22,5	6,7	44,89	22,78
F	17,8	3,3	10,89	21,7	5,9	34,81	19,47
M	16,3	1,8	3,24	19,3	3,5	12,25	6,30
A	14,5	0,0	0,00	15,4	-0,4	0,16	0,00
M	13,7	-0,8	0,64	12,2	-3,6	12,96	2,88
J	12,1	-2,4	5,76	9,3	-6,5	42,25	15,60
J	11,8	-2,7	7,29	9,3	-6,5	42,25	17,55
A	11,6	-2,9	8,41	10,2	-5,6	31,36	16,24
S	12,7	-1,8	3,24	13,0	-2,8	7,84	5,04
O	13,8	-0,7	0,49	16,5	0,7	0,49	-0,49
N	15,3	0,8	0,64	18,9	3,1	9,61	2,48
D	17,0	2,5	6,25	21,7	5,9	34,81	14,75

En este ejemplo:

$$\bar{T}_x = 14,5^\circ\text{C} \quad \text{y} \quad \bar{T}_y = 15,8^\circ\text{C}$$

$$\Sigma u^2, \text{ es decir, } \Sigma (x_i - \bar{x})^2 = 58,41$$

$$\Sigma v^2, \text{ es decir, } \Sigma (y_i - \bar{y})^2 = 273,68$$

$$\Sigma uv, \text{ es decir, } \Sigma (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 122,60$$

Por lo tanto,

$$a = \frac{273,68 - 58,41 \pm \sqrt{-215,27^2 + 4(122,60)^2}}{245,20}$$

es decir,

$$a = \frac{215,27 + 326,20}{245,20} = \frac{541,47}{245,20} = 2,21$$

Sobre la figura 1 han sido representadas las rectas a y $T_x = T_y$ y las nubes de puntos. Los pequeños círculos numerados corresponden a las intersecciones de las abscisas y las ordenadas establecidas a partir de las medias mensuales indicadas en el cuadro precedente. Los puntos corresponden a las situaciones particulares de los 144 meses del período elegido.

El umbral de inversión S_x al que nos hemos referido antes es, en este caso, de $13,5^\circ\text{C}$. Cuando la temperatura sobrepasa ese valor en Valparaíso hay un 53% de casos (76 sobre 144) en los que las temperaturas "homólogas" de Los Andes son más elevadas (= inversiones térmicas), y cuando las temperaturas de Valparaíso caen por debajo de $13,5^\circ\text{C}$, los valores correspondientes de los Andes son inferiores a aquéllas (= gradientes normales) en un 31% de los casos (45 sobre 144). Eso quiere decir que en 121 casos (84% del total) la conducta de las temperaturas comparadas ha sido "normal".

La "anormalidad" se reduce, entonces, a un 16% de los casos: en un 8% (12 casos sobre 144) a temperaturas inferiores a $13,5^\circ\text{C}$ en Valparaíso corresponden temperaturas más altas en Los Andes (10 casos en septiembre y octubre) y en el otro 8% (11 casos sobre 144) temperaturas superiores al "umbral" en Valparaíso corresponden a temperaturas más bajas en Los Andes (9 casos en mayo-abril, es decir en pleno otoño).

En el cuadro 2 hemos indicado para cada par de estaciones de Chile Central la desnivelación, los valores T_x y T_y y la pendiente de la recta a ; estos elementos nos han permitido caracterizar el comportamiento del gradiente térmico y, en particular, el valor de su crecimiento (+) o de su disminución (-) para un aumento de un grado en la temperatura de la estación más baja: $\Delta\gamma$ por $^\circ\text{C}$ (T_x). Una técnica bastante simple ha sido empleada para determinar dichos valores: la divergencia o la convergencia de las rectas a y $T_x = T_y$ se indica sobre el eje de las x bajo la forma de una línea oblicua cuya pendiente indica el valor del aumento o de la disminución de $T_x - T_y$. Es necesario tener en cuenta que esos valores deben ser divididos por ΔZ (hm) de S_x y S_y para tener exactamente las cifras de $\Delta\gamma$ por $^\circ\text{C}$ (T_x). Es evidente que cuando la recta a posee una pendiente igual o muy cercana a 1 no hay variación sensible del gradiente térmico a través del año; es por eso que no hemos indicado ningún valor en los casos en que $0,97 \leq a \leq 1,03$.

Gracias a estos datos hemos finalmente determinado varios tipos de pares de estaciones de acuerdo al comportamiento de los gradientes térmicos a través del año. Los tipos se definen posteriormente.

Los tipos retenidos en la anterior clasificación, además de algunos otros que pueden presentarse en distintas condiciones climáticas, son los siguientes:

I₁: Inversiones térmicas generalizadas con valores homogéneos durante todo el año ($T_{en} < T_{yn}$; $0,97 \leq a \leq 1,03$).

I₂: Inversiones térmicas generalizadas en aumento hacia el período cálido ($T_{en} < T_{yn}$; $a > 1,03$).

I₃: Inversiones térmicas generalizadas en disminución hacia el período cálido ($T_{en} < T_{yn}$; $a < 0,97$).

I₄: Gradientes normales limitados al período más frío ($T_e < T_y$; $a > 1,03$).

G₁: Inversiones térmicas limitadas al período más cálido ($T_e > T_y$; $a > 1,03$).

G₁: Gradientes normales generalizados con valores homogéneos durante todo el año ($T_{en} > T_{yn}$; $0,97 \leq a \leq 1,03$).

G₂: Gradientes normales generalizados en aumento hacia el período cálido ($T_{en} > T_{yn}$; $a < 0,97$).

G₃: Gradientes normales generalizados en disminución hacia el período cálido ($T_{en} > T_{yn}$; $a > 1,03$).

Finalmente, algunos pares de estaciones de Chile Central han sido elegidos para mostrar gráficamente los caracteres principales de los tipos establecidos en este trabajo (figura 2).

Las diferencias discernibles entre los pares de estaciones provienen, como se ha podido ver en el cuadro 2 y en la figura 2, no sólo de las relaciones entre T_x y T_y sino que también, y sobre todo, de la diversidad de valores de las pendientes de las rectas a . En efecto, el acercamiento o el alejamiento de las curvas térmicas anuales de las estaciones de cada par se traduce por valores de a inferiores o superiores a 1. La tercera categoría general que corresponde a $0,97 \leq a \leq 1,03$ comprende los casos de los pares de estaciones cuyas curvas térmicas tienen casi la misma conducta anual.

Esta clasificación permite darse cuenta de la variedad de los factores geográficos que influyen sobre el comportamiento de las temperaturas. A cada caso de diferenciación térmica corresponde un valor particular de la pendiente de la recta a . Así, cuando un par está constituido por una estación litoral o interior, pero relativamente sometida a las influencias oceánicas, y por otra de comportamiento marcadamente continental (caso de Valparaíso-Los Andes), la recta a tiene una pendiente superior a 1 porque la continentalidad provoca el alza y la baja más rápidas de las temperaturas a través del año en la estación no-litoral, siendo entonces frecuentes las inversiones térmicas. Si se trata de pares formados por una estación costera y por otra de la alta montaña andina (caso de Santo Domingo-El Yeso) los gradientes térmicos, aunque normales durante todo el año, muestran una neta disminución hacia el período cálido y en ciertas circunstancias pueden evolucionar hacia las inversiones de temperaturas: la pendiente de la recta a es también aquí superior a 1. En

Cuadro Nº 2

Los tipos de pares de estaciones de Chile Central de acuerdo al comportamiento de los gradientes térmicos a lo largo del año

Estaciones	$\Delta Z (m)$	T_z/T_y^* (°C)	$\frac{a}{-}$	$\frac{\Delta \gamma}{^\circ C(Tx)}$ por	Tipos
Llay-Llay- Los Andes	431	13,8/15,8	1,47	-0,46	I ₂
Santiago- Los Andes	296	14,5/15,8	1,10	-0,10	I ₂
Sto. Domingo S. José de M.	994	11,7/12,4	1,59	-0,60	I _x
Quillota- Los Andes	688	14,3/15,8	1,63	-0,64	I _x
Valparaíso- Los Andes	775	14,5/15,8	2,21	-1,25	I _x
Valparaíso- Llay-Llay	344	14,4/13,8	1,54	-0,53	G ₁
Parrón- El Teniente	1442	12,8/10,2	1,00	—	G ₁
S. José de M.- El Teniente	1074	13,3/10,0	1,00	—	G ₁
Santiago- El Teniente	1614	14,5/10,0	0,95	+0,06	G ₂
Santiago- S. José de M.	540	14,5/13,3	0,92	+0,08	G ₂
Rancagua- El Teniente	1634	12,9/10,6	0,93	+0,08	G ₂
Cerrillos- El Cristo Redentor	3324	14,2/-1,4	0,87	+0,12	G ₂
El Yeso- El Cristo Redentor	1355	6,1/-1,6	0,72	+0,28	G ₂
S. José de Maipo- El Yeso	1415	12,7/ 6,1	1,35	-0,34	G ₃
Cerrillos- El Yeso	1969	14,2/ 6,1	1,20	-0,20	G ₃
Valparaíso- El Cristo Redentor	3789	14,3/-1,4	1,73	-0,70	G ₃
Quintero- El Cristo Redentor	3827	12,7/-1,4	2,02	-1,05	G ₃
Sto. Domingo- El Yeso	2409	11,7/ 6,1	2,13	-1,13	G ₃

(*) Las diferencias que se advierten entre las cifras de las temperaturas medias de algunas estaciones, según sean los pares de los que ellas forman parte, se deben al empleo de series diferentes.

REGIMEN ANUAL DEL GRADIENTE TERMICO MEDIO

Caso de Valparaíso — Los Andes (ΔZ : 775 m)

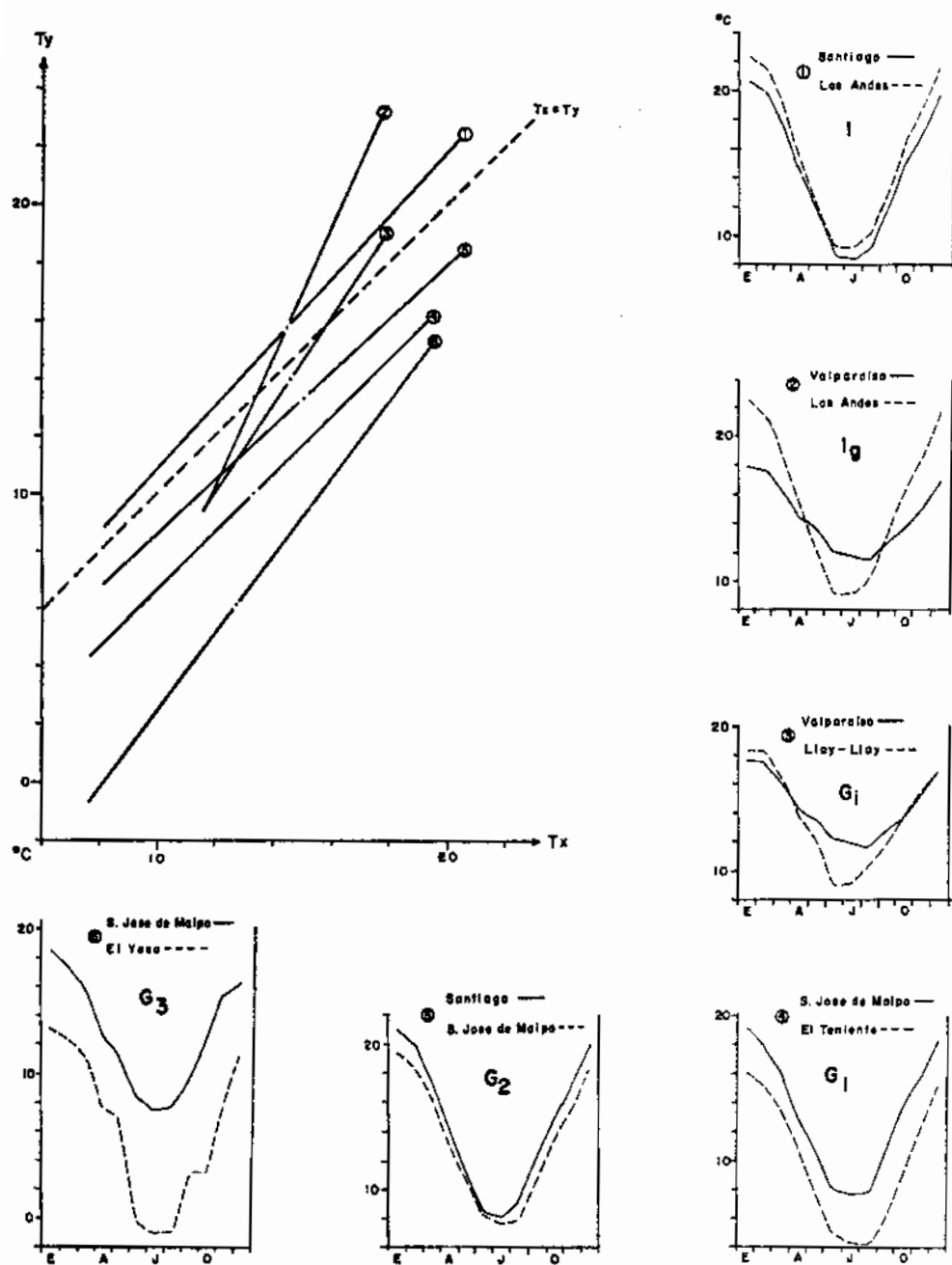


Fig. 2

cambio, un par que comprenda dos estaciones interiores en las cuales los factores geográficos que actúan sobre las temperaturas sean aproximadamente los mismos estará representado por una recta a de pendiente muy próxima o igual a 1 (caso de Parrón-El Teniente). Por último señalaremos que los pares de estaciones de la banda adosada a las vertientes medias de la Cordillera de los Andes y que están formados por una estación de piedemonte (Santiago, Rancagua, Cerrillos, por ejemplo) y por otra de altura (El Teniente, El Cristo Redentor) concentran todos los casos en que los gradientes térmicos normales aumentan hacia el período cálido; ésto se entiende bien si pensamos que las estaciones más bajas de cada uno de estos pares están relativamente encerradas desde el punto de vista topográfico lo que hace que posean valores de amplitud térmica anual bastante más importante que los de las estaciones más altas, cuyo comportamiento en este sentido se aproxima al de las estaciones de la costa.

La constatación de los hechos anotados muestra lo difícil que es hablar de una cierta normalidad de los gradientes térmicos a una escala regional. Los múltiples factores aleatorios de orden geográfico que deben ser tomados en consideración para llegar a una evaluación correcta de las variaciones de las temperaturas con la altura obligan a revisar y a matizar los métodos de cálculo tradicionales. Es por eso que nos ha parecido imposible llegar a determinar los gradientes térmicos de una región cualquiera a partir solamente de los datos de temperaturas y altitudes como se hace de costumbre. El problema es mucho más complejo y sólo nos encontramos a mitad de camino antes de una solución totalmente satisfactoria.