

Géologie/Geology

Déséquilibres U/Th, rapports allo/isoleucine et teneurs en ^{18}O des mollusques de dépôts littoraux pléistocènes du sud du Pérou : une base d'appréciation chronostratigraphique

LUC ORTLIEB, BASSAM GHALEB, Claude HILLAIRE-MARCEL, José MACHARÉ
et Pierre PICHET

Résumé – Les méthodes géochronologiques appliquées à l'étude des fossiles littoraux n'autorisent pas des corrélations univoques entre les terrasses marines pléistocènes. Toutefois, en combinant plusieurs approches, telles que la racémisation des acides aminés et les déséquilibres U/Th, mesurés sur un nombre statistiquement significatif d'échantillons, en prenant également en compte les données de la paléocéologie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$), il a été possible d'établir une chronologie relative des dépôts mis en place lors des hauts niveaux marins pléistocènes, le long du littoral sud-péruvien, et de fixer de façon non ambiguë l'âge et la position de la terrasse correspondant au haut niveau marin du dernier interglaciaire (stade isotopique 5e).

Th/U disequilibria, allo/isoleucine ratios and ^{18}O content of mollusc shells from Pleistocene littoral deposits of southern Peru: a basis for geochronological assessments

Abstract – None of the dating methods of marine faunal remains allows unequivocal age assessments. However, by combining several approaches, such as amino-acid racemization rates measured on a statistically significant number of samples, Th/U disequilibria, and by taking into account environmental isotope data (^{18}O), it has been possible to set a stratigraphy of raised marine deposits of Pleistocene age in southern Peru and to identify unambiguously the terrace formed during the highest sea level of the last interglacial (isotopic substage 5e).

Abridged English Version – The calculation of Pleistocene uplift rates along the southern Peruvian coast, is largely based on correlation and absolute age determinations of raised marine deposits ([1], [2], [3]). Unfortunately, most methods for dating fossil molluscs often fail to provide precise or reliable ages either as a consequence of open radioactive systems (Th/U disequilibria and derived physical methods, e.g. Electron Spin Resonance) or because they are temperature/time dependent (amino-acid racemization rates). Nevertheless, recent studies by Hsu *et al.* ([4], [5]) in the San Juan area of southern Peru (Fig. 1) allowed for the setting of 6 aminozones (I, IIa and IIb, III, IV and V) on the basis of allo/isoleucine (A/I) ratios in fossil shells of *Protothaca thaca*. These aminozones were tentatively correlated with isotopic stages 5a/c(?), 5e, 7, 9, 11/13 and 19/21/23 [6], respectively. This aminostratigraphy has been slightly revised and extended to the Ilo area [7], more to the south (Fig. 1), where Hsu *et al.* concluded, from A/I measurements in fossil assemblages of the Pampa del Palo terrace (Fig. 1), that the area had subsided, in late Middle Pleistocene time, prior to its recent uplift. Around Ilo, marine terraces and deposits can be found at elevations rising from +6 m, to +10, +15/+20 (Pampa del Palo Terrace), +35, +50, +60, +70, up to 350 m ([9], [10]), a pattern which rather suggests continuous uplift. In order to solve this problem, fossil assemblages from the major morphostratigraphic marine units were sampled again (Fig. 1) and analyzed for their oxygen, Th and U isotope contents, and also for their A/I ratios.

Current analytical methods were used ([11] to [14]) and A/I ratios in the most abundant mollusc shells (*Mulinia cf. edulis*, *Mesodesma donacium*, *Eurhomalea rufa* and *E. lenticularis*,

Note présentée par Jean DERCOURT.

Protothaca thaca) were all converted to *Protothaca thaca* equivalent using equations established by Hsu [4] or our own interspecific calibrations [8]. Results are compiled, for each morphostratigraphic unit, as frequency histograms (Fig. 2), where each datum is plotted as a Gauss curve with a $\pm 3\sigma$ distribution. Standard deviations ($\pm 1\sigma$) are $\pm 0.1\text{‰}$ ($^{18}\text{O}/\text{PDB}$), $\pm 5\%$ (A/I) and approximately $\pm 2\%$ for Th/U isotope ratios.

At least two assemblages are mixed in the Pampa del Palo (Fig. 1) samples. This is shown by the bimodal distributions of A/I ratios (1st mode: ~ 0.44 —aminozone II *a* of Hsu *et al.* [7]; 2nd mode ~ 0.54 —aminozone II *b* [7]). Very likely, fossil shells from an older marine unit (A/I ~ 0.54) were reworked and mixed with the *in situ* fauna (A/I ~ 0.44). The source of the reworked material seems to be the +25 m unit, on which the Pampa del Palo terrace rests, and which also shows a bimodal distribution of A/I ratios: 1st mode at ~ 0.57 (this time, the *in situ* fauna) and 2nd mode at 0.75 (again, in shells reworked from older units). Shells collected in living position in both units yielded Th/U ages of 135 ± 5 and 180 ± 5 ka, respectively (Fig. 2) suggesting deposition during the isotopic substages 5 *e* (Pampa del Palo terrace) and 7 *a* (the +25 m unit). The assignment of the Pampa del Palo unit to the highest sea level of the last interglacial is supported by ^{18}O data (its fauna shows the lowest content in heavy isotope of all the analyzed assemblages; Fig. 2), and also by the A/I ratio (~ 0.36 —aminozone I [8]) and Th/U age (90 ± 5 ka) obtained on the lower terrace of +10 m (north of Ilo) which apparently formed during a younger high sea level episode of isotopic stage 5 (probably substage 5 *a*).

The upper morphostratigraphic units cannot be precisely dated: their A/I and Th/U ratios (Fig. 2) tend towards the asymptotic limits of both methods. However, these geochronological indicators show an orderly distribution (Fig. 3) and suggest an assignment of the +35 m unit to an episode older than those which allowed deposition of the +60 and 70 m units. We hypothesize that the material found at +35 m was deposited during a relatively low sea level episode.

It is concluded from the present study that most methods applied to the setting of a chronostratigraphy of raised marine deposits from strongly uplifted areas do not allow unequivocal interpretations. Reworking of fossil shells from older deposits, core material left from low relative sea levels and overlapping aminozones (at $\pm 1\sigma$) all prevent the dating of a single marine unit. However, when combined and applied to the study of sequences of terraces, geochemical approaches may at least allow the identification of the deposits formed during the last interglacial. In the present case, the assignment of the Pampa del Palo to the isotopic substage 5 *e* allows the calculation of an uplift rate of about $150 \text{ mm}/10^3$ years for the area during the late Pleistocene.

I. INTRODUCTION. — La région côtière du sud du Pérou (14-18°S) connaît des mouvements verticaux importants liés à la subduction de la plaque de Nazca sous le continent sud-américain. On y observe ainsi de nombreux étagements de terrasses marines pléistocènes ([1], [2], [3]). Le calcul des taux de surrection de la frange côtière, au cours du Quaternaire, repose en grande partie sur la corrélation de telles unités morphostratigraphiques et la datation des fossiles qu'elles recèlent. Or, les méthodes radiométriques (directes : déséquilibre U/Th, et indirectes : résonance du spin de l'électron RSE) sont parfois invalidées par l'ouverture relative des systèmes radioactifs [4]. De façon similaire, la racémisation des acides aminés, fonction du temps et de la température, ne peut livrer des conclusions univoques et sa résolution chronologique est peu satisfaisante. Dans la

région de San Juan (*fig. 1*), des travaux récents ([4], [5]), basés sur l'épimérisation allo/isoleucine (A/I) de lamellibranches, ont néanmoins abouti à la définition de six « aminozones » (I, II *a*, II *b*, III, IV et V) calibrées par des mesures de RSE et associées respectivement aux stades isotopiques 5 *a/c* (?), 5 *e*, 7, 9, 11/13, 19/21/23 du Pléistocène supérieur et moyen [6]. Cette aminostratigraphie a été légèrement révisée (II *a* : $0,44 \pm 0,08$; II *b* : $0,550 \pm 0,065$; III : $0,64 \pm 0,06$; IV : $0,86 \pm 0,02$) et étendue, plus au sud, à la région d'Ilo [7]. Ces études antérieures appellent plusieurs commentaires. D'une part, l'absence de corrélation morphostratigraphique, entre les deux régions distantes d'environ 500 km, hypothèque la transposition des aminozones de l'une à l'autre; d'autre part, les aminozones se recouvrent statistiquement ($\pm 1 \sigma$) et ne peuvent être utilisées aux fins de datation d'une unité prise isolément. Enfin, nos travaux, le long du littoral sud-péruvien [8], démontrent une ouverture relative des systèmes radioactifs U/Th, en particulier de forts déséquilibres $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ liés à la mobilité du ^{228}Ra intermédiaire; les bases chronométriques indirectes (RSE) sur lesquelles a été fondée l'aminostratigraphie régionale doivent donc être étayées. La présente Note concerne précisément la région d'Ilo; elle fait état des résultats d'analyses A/I, U/Th et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de mollusques fossiles d'une dizaine de localités s'échelonnant jusqu'à environ +70 m d'altitude. Ces nouvelles données conduisent à nuancer les interprétations aminostratigraphiques mentionnées plus haut ainsi que les conclusions néotectoniques qu'elles impliquaient [8].

II. SITUATION GÉOLOGIQUE. — La région d'Ilo est propice à l'étude chronostratigraphique des terrasses et dépôts marins plio-quadernaires. Ceux-ci s'étagent en effet de +6 à +350 m au-dessus du niveau actuel de la mer ([9], [10]). L'une des plus basses terrasses, et la mieux développée, la Pampa del Palo, s'étend entre +15 et +20 m d'altitude, au sud de la ville d'Ilo (*fig. 1*). Cette unité morphostratigraphique majeure est constituée de lumachelles et de sédiments laguno-marins. Elle s'appuie, vers sa marge intérieure, sur une unité littorale plus ancienne, constituée de rudites fossilifères, qui culmine vers +25 m d'altitude. En amont, plusieurs autres unités marines s'observent à des altitudes croissantes (vers +35, +40, +50, +60, +70 m et plus [10]). Enfin, on relève au nord d'Ilo, une terrasse moins élevée que la Pampa del Palo (environ +10 m). Cette disposition laisse croire que cette région a été soulevée de façon continue au cours du Quaternaire ([3], [10]). Or, à partir de données aminostratigraphiques obtenues sur les dépôts de la Pampa del Palo, Hsu et coll. ([4], [5]) ont conclu que la région avait subi une subsidence, vers la fin du Pléistocène moyen. Pour résoudre cette contradiction apparente, qui présente d'importantes implications néotectoniques, une révision des données morphostratigraphiques et géochronologiques régionales a paru nécessaire.

III. ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODES D'ANALYSE. — Notre étude repose essentiellement sur des mesures d'épimérisation allo/isoleucine (A/I), ainsi que sur des analyses isotopiques (déséquilibres U/Th et teneurs en ^{18}O), effectuées, pour la plupart, sur des coquilles de lamellibranches à tests aragonitiques (*Protothaca thaca*, *Mesodesma donacium*, *Mulinia* cf. *edulis*, *Eurhomalea rufa* et *E. lenticularis*) prélevées dans les unités morphostratigraphiques principales. Pour des fins de comparaison, la faune de dépôts de cuisine d'âge Holocène a également été recueillie. En laboratoire, l'intégrité minéralogique des échantillons d'aragonite a été contrôlée par la méthode radiocristallographique habituelle [11]; les analyses géochimiques ont été réalisées selon les techniques courantes ([12], [13], [14]). Les rapports A/I des genres *Mulinia*, *Mesodesma* et *Eurhomalea*, ont été transcrits en équivalent A/I-*Protothaca*, sur la base des équations proposées par Hsu [4]

ou établies à partir de nos propres calibrations interspécifiques [8]. Les résultats complets, non seulement pour la région d'Ilo, mais pour celles de San Juan, de Chala et d'Ite, que nous avons également échantillonnées (*fig. 1*), feront l'objet d'une publication exhaustive [8]. Nous les présentons ici, pour la seule région d'Ilo, sous la forme condensée d'histogrammes de fréquence (*fig. 2*) : les données sont cumulées sous leur forme gaussienne ($\pm 3\sigma$). La reproductibilité analytique ($\pm 1\sigma$) des analyses A/I et ^{18}O (en unités δ par comparaison à l'étalon PDB) sont respectivement de $\pm 5\%$ et de $\pm 0,1\text{‰}$. Les écarts-types des rapports d'activité $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ et $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ont été calculés à partir des statistiques de comptage par spectrométrie α .

IV. CHRONOSTRATIGRAPHIE DE LA PAMPA DEL PALO. — Les rapports A/I obtenus sur la faune de la Pampa del Palo illustrent les difficultés d'interprétation chronostratigraphique de telles données. Pris globalement, les échantillons livrent un rapport A/I de $0,54 \pm 0,08$ ($n=16$). Il est tentant de conclure que celui-ci correspond à l'aminozone IIb (A/I = $0,55 \pm 0,065$) établie par Hsu et coll. [7]. Toutefois, une analyse plus poussée de l'histogramme de fréquence (*fig. 2*) met en évidence un mode statistiquement significatif à 0,44, que l'on peut associer à l'aminozone IIa proposée par les mêmes auteurs. On peut supposer que les rapports A/I qui constituent un second mode vers 0,54 (*fig. 2*) rendent compte, soit d'un taux de racémisation plus élevé chez certains échantillons, soit d'un mélange de populations : des coquilles plus anciennes auraient été « reprises » lors de la mise en place de la terrasse. On voit donc que les résultats A/I peuvent donner lieu à plusieurs interprétations. Les mesures des déséquilibres U/Th ont été réalisées sur des échantillons considérés comme *in situ*. Les rapports d'activité $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ sont extrêmement élevés (>90); ils démontrent la quasi-absence de radio-isotopes d'origine « détritique » [13]. Les concentrations en uranium et rapports d'activité $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ et $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ sont très homogènes (*fig. 2*), ce qui porte à croire qu'une clôture relative du milieu géochimique s'est instaurée rapidement; compte tenu de l'aridité qui caractérise la côte péruvienne, celle-ci est plausible. Les rapports moyens observés ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U} = 0,735 \pm 0,015$; $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1,17 \pm 0,03$) livrent un âge de $135\,000 \pm 5\,000$ ans qui conduit à attribuer la Pampa del Palo au haut niveau marin du stade isotopique 5e, donc à valider le mode A/I de 0,44 (aminozone IIa). Les teneurs en ^{18}O des assemblages coquilliers constituent un autre élément d'appréciation (*fig. 2*); elles sont relativement basses, avec un mode à $+1,7\text{‰}$ (unités δ); par comparaison, les assemblages holocènes ou antérieurs à ceux de la Pampa del Palo ont livré des compositions isotopiques plus élevées, sinon plus étalées vers des valeurs élevées (*fig. 2*). La faune de la Pampa del Palo semble donc issue d'une mer plus chaude ou plus diluée par les eaux de fonte glaciaires que celles qui présidèrent à la mise en place des autres unités fossilifères : le stade isotopique 5e paraît tout indiqué [6]. Ainsi, en combinant les diverses approches méthodologiques, semble-t-il raisonnable d'attribuer l'unité morphostratigraphique de la Pampa del Palo au plus haut niveau marin du dernier interglaciaire. Cette interprétation est corroborée, par défaut, par les données obtenues sur les dépôts antérieurs (unité de +25 m, voir point V ci-dessous) et postérieurs à la terrasse de la Pampa del Palo. En effet, des spécimens de *Protothaca thaca*, prélevés, au nord d'Ilo dans la terrasse de +10 m, ont livré les rapports suivants : A/I = $0,36 \pm 0,06$, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U} = 0,57 \pm 0,02$ et $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1,12 \pm 0,04$; les déséquilibres U/Th indiquent un âge de $90\,000 \pm 5\,000$ que semble confirmer le rapport A/I. Cette terrasse inférieure à la Pampa del Palo aurait été ainsi mise en place au cours d'un haut niveau marin plus récent (stade isotopique 5a ou 5c?).

V. LES UNITÉS MORPHOSTRATIGRAPHIQUES SUS-JACENTES. — Les dépôts fossilifères qui culminent vers 25 m d'altitude (*fig. 1*) ont livré des rapports A/I plus élevés que ceux de la Pampa del Palo et « étalés » sur l'histogramme de fréquence (*fig. 2*). Ces rapports ne permettent pas d'attribuer l'unité à une aminozone précise; l'un des modes observés sur l'histogramme (A/I équivalent *Protothaca* $\sim 0,57$; *fig. 2*) pourrait toutefois correspondre à la faune, *in situ* dans l'unité, mais reprise lors de la mise en place ultérieure de la grande terrasse de la Pampa del Palo. Quoi qu'il en soit, les données U/Th semblent, ici encore, très homogènes (*fig. 2*); elles ont été obtenues sur des valves de moules accolées et des balanes fixées sur des blocs. Les rapports $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ($0,83 \pm 0,04$) et $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($1,15 \pm 0,08$) livrent un âge de $180\,000 \pm 16\,000$ ans : cette unité aurait ainsi été mise en place lors d'un épisode de haut niveau marin antérieur au stade isotopique 5e, probablement au cours du stade 7a [6]. Les teneurs en isotopes lourds, bien groupées sur l'histogramme de fréquence (*fig. 2*), définissent un mode à $+2,5$ ‰ (en unités δ), soit un enrichissement d'environ $0,8$ ‰, par comparaison à la faune de la Pampa del Palo. Un tel écart pourrait rendre compte d'une dilution et température moindres des eaux de surface, au cours du stade isotopique 7a, par comparaison au stade 5e [6].

Dans les unités morphostratigraphiques plus élevées (notamment celles de +35, +60 et +70 m d'altitude; *fig. 1*), les rapport A/I et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ mesurés dans les coquilles fossiles tendent vers les valeurs limites; aucune conclusion chronologique précise ne peut être raisonnablement attendue. Toutefois, à défaut de fournir l'âge absolu de mise en place des dépôts, ces méthodes permettent d'en discuter l'âge relatif. Ainsi, les rapports A/I et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ mesurés dans les assemblages des dépôts de +35, +60 et +70 m, concourent-ils à indiquer un âge plus élevé pour le premier d'entre eux (*fig. 3*), bien que cela puisse paraître paradoxal. Rien n'interdit, toutefois, de considérer que cette unité morphostratigraphique pourrait avoir été mise en place au cours d'un bas niveau marin antérieur aux épisodes ayant présidé à la formation des unités sus-jacentes; cette hypothèse expliquerait l'altitude anormalement basse à laquelle elle s'observe. Ici hélas, les teneurs en ^{18}O des assemblages ne s'avèrent pas un bon « discriminant » : elles sont indistinctement élevées dans les trois unités.

VI. CONCLUSIONS. — Cette étude de la région d'Ilo illustre les difficultés rencontrées pour l'établissement d'une véritable chronostratigraphie de dépôts littoraux pléistocènes. Les « remaniements » éventuels de dépôts d'un épisode de haut niveau marin à un autre, la possibilité de rencontrer, dans des régions de forte surrection, des unités mises en place au cours de bas niveaux marins, l'histoire géochimique et thermique complexé des assemblages coquilliers échantillonnés, interdisent souvent les interprétations univoques. Dans le cas présent, les taux de racémisation allo/isoleucine, les rapports $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ainsi que les teneurs en ^{18}O , ont concouru à l'établissement d'une chronologie relative d'unités morphostratigraphiques parfois en « situation anormale » (tel le site de +35 m) et qui s'échelonnent des stades isotopiques 5 à ≥ 9 . On notera également que les indicateurs géochimiques utilisés présentent un ordonnancement identique dans la séquence étudiée (*fig. 3*). Enfin, on a pu identifier avec une quasi-certitude la terrasse mise en place lors du haut niveau marin du stade isotopique 5a (la Pampa del Palo). Sa position altitudinale permet de calculer un taux de surrection de l'ordre de $150 \text{ mm}/10^3$ ans pour la région d'Ilo, au cours du Pléistocène supérieur.

Les auteurs remercient pour leur soutien l'ORSTOM (URIE), le Conseil de Recherche en Sciences naturelles et en Génie du Canada, et le Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche du Québec. Note préparée dans le cadre d'une convention scientifique ORSTOM-I.G.P. (Pérou).

Note remise le 7 octobre 1991, acceptée le 18 novembre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. A. BROGGI, *Bol. Soc. Geol. Peru*, 19, 1946, p. 21-33.
 [2] J. MACHARE, *Thèse Doct.*, Paris XI-Orsay, 1987.
 [3] L. ORTLIEB et J. MACHARE, *Symp. intern. Géodynamique andine* Grenoble, ORSTOM, Coll. et Sémin., 1990, p. 95-98.
 [4] J. HSU, *Thèse Ph. D.*, Cornell Univ., 1988.
 [5] J. HSU et coll., *Quaternary Sci. Rev.*, 8, 1989, p. 255-262.
 [6] N. J. SHACKLETON et N. D. OPDYKE, *Quaternary Res.*, 3, 1973, p. 39-55.
 [7] J. HSU et coll., *Soc. Amer., Ann. Meet. Abstr.*, 22, 1990, p. A-146.
 [8] L. ORTLIEB et coll., Néotectonique du littoral sud péruvien : estimation du taux de soulèvement à partir des positions chronostratigraphiques de terrasses marines du Pléistocène moyen et supérieur (en préparation).
 [9] S. NARVAEZ, *Bol. Com. Carta Geol. Nac.*, 17, 1964.
 [10] J. L. GOY et coll., *Bull. INQUA, Neotect. Comm.*, 13, 1990, p. 72-73.
 [11] T. T. DAVIES et P. R. HOPPER, *Mineralog. Mag.*, 33, 1963, p. 608-612.
 [12] P. PICHET et coll., *Quaternary Sci. Rev.*, 8, 1989, p. 193-196.
 [13] C. HILLAIRE-MARCEL et C. CAUSSE, *Can. J. Earth Sci.*, 26, 1989, p. 1041-1052.
 [14] C. HILLAIRE-MARCEL, *Geol. Assoc. Can., Spec. Paper*, 35, 1989, p. 177-194.

L. O. : *Mission ORSTOM, Fac. Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chili;*
 B. G., C. H.-M. et P. P. : *GEOTOP, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. A., Montréal, Québec, H3C 3P8, Canada;*
 J. M. : *Instituto Geofísico del Peru, Apartado 3747, Lima 100, Pérou.*

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

- Fig. 1. — Localisation de la région d'Ilo (Sud Pérou), et schéma morphologique des unités étudiées.
 Fig. 1. — *Location map of the Ilo area and geomorphological sketch of the deposits studied.*
 Fig. 2. — Histogramme de fréquence des rapports A/I (Allo/Isoleucine), $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ et des teneurs en ^{18}O des principales unités échantillonnées.
 Fig. 2. — *Frequency histograms of A/I, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios, and of $\delta^{18}\text{O}$ values in the major units sampled.*
 Fig. 3. — Concordance des indicateurs géochronologiques dans la séquence étudiée.
 Fig. 3. — *Agreement between geochronological indicators in the sequence studied.*

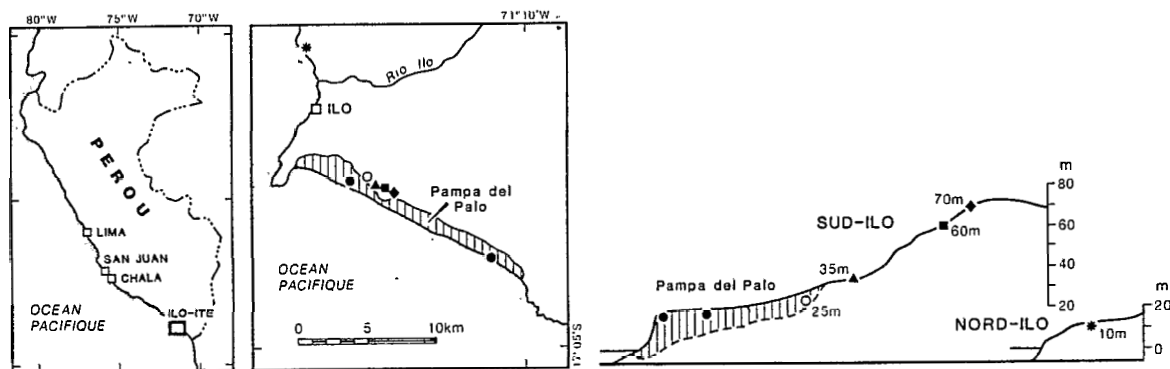


Fig. 1

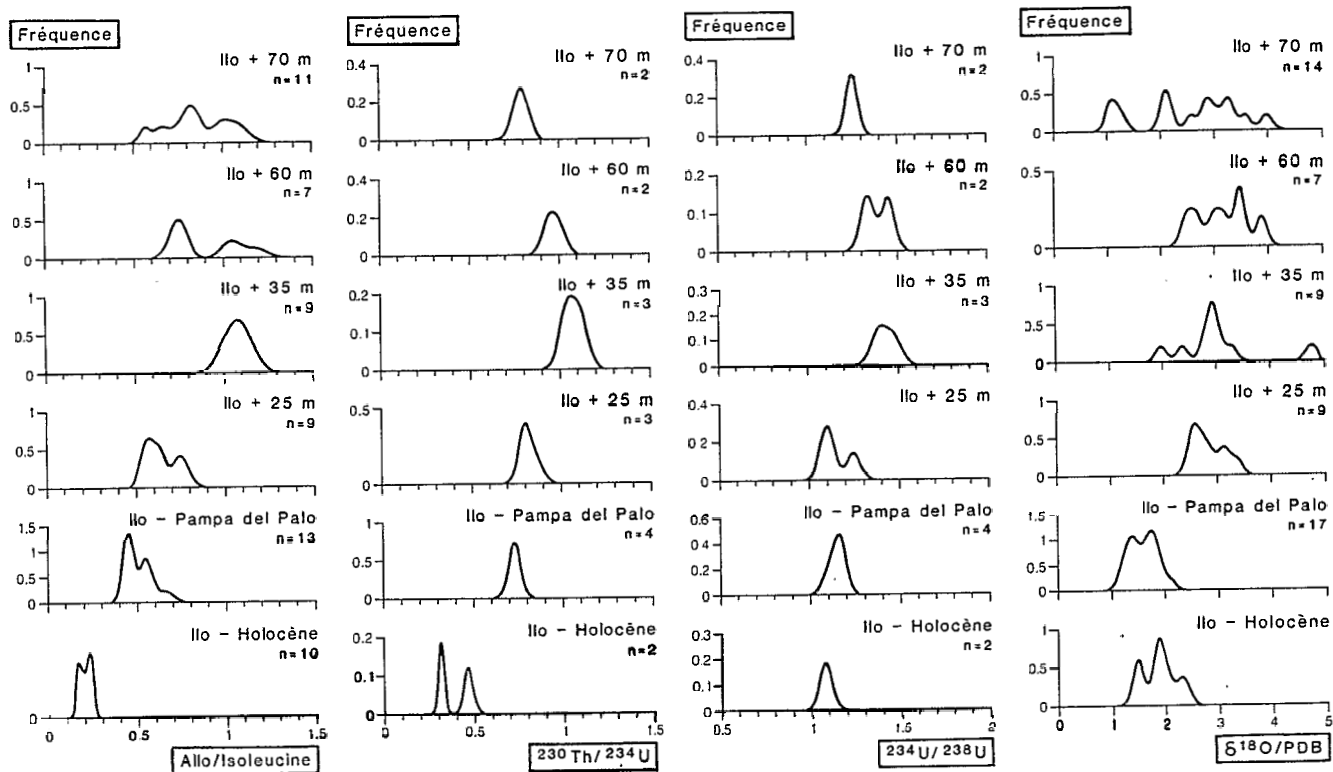


Fig. 2

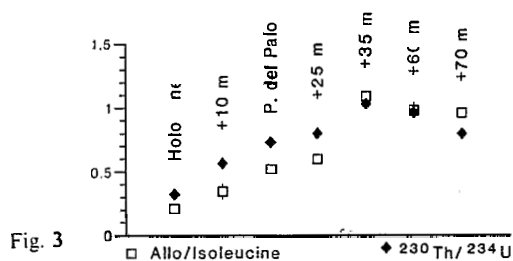


Fig. 3