

FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS COMO INDICADORES DE CONDICIONES REDOX EN LOS SEDIMENTOS DEL MARGEN CONTINENTAL SUPERIOR DE PERÚ CENTRAL Y SU IMPLICANCIA EN LAS RECONSTRUCCIONES PALEOCEANOGRÁFICAS

Jorge CARDICH ^{1,2}, Dennis ROMERO ^{2,3}; Alexander PÉREZ ^{2,3}, Luis QUIPÚZCOA ³, Abdelfettah SIFEDDINE ^{1,4}; Maria MORALES ⁵ & Dimitri GUTIÉRREZ ^{2,3}

INTRODUCCIÓN

La presencia de zonas con deficiencia de oxígeno disuelto es una de las características más resaltantes del océano global. Una permanente condición pobre en oxígeno es comúnmente encontrada bajo zonas de intenso afloramiento y alta productividad primaria, debido a ciertos factores físicos y bioquímicos. Esta característica es conocida como zona de mínima de oxígeno (ZMO) y está relacionada a la remineralización de nutrientes necesarios para los productores primarios, al ciclaje de elementos químicos biológicamente importantes, a la ecología de organismos de superficie y del fondo y a la emisión o entrapamiento de gases de efecto invernadero, entre otros aspectos. Es en este marco en el cual se estudia la variabilidad espacio-temporal de las condiciones de la ZMO en el océano. La reconstrucción de las condiciones pasadas del océano, como la intensidad de la ZMO, es abordada por la paleoceanografía valiéndose de múltiples indicadores geoquímicos y biogénicos en los registros sedimentarios. Uno de los indicadores biogénicos más explotados son los foraminíferos bentónicos. Estos organismos unicelulares están distribuidos en todos los sistemas marinos y presentan elevadas abundancias. Además, son altamente sensibles a los cambios ambientales, mostrando una estacionalidad, y algunas especies

muestran una gran tolerancia a la deficiencia de oxígeno. La principal ventaja es que las testas, que son calcáreas, pueden preservarse muy bien en el sedimento bajo una condición de ZMO. Estos aspectos permiten que los cambios comunitarios puedan quedar impresos en el registro microfósil de una manera casi fiel, valiéndoles su amplia utilización como microfósiles para mostrar los cambios del ambiente a través del tiempo. El uso de los foraminíferos bentónicos como indicadores de condiciones pasadas requiere de su calibración a partir de la relaciones entre la biota con los atributos ambientales, así como con los procesos fisicoquímicos que intervienen en la preservación de las testas desde la muerte de los foraminíferos. La calibración puede comprobarse llevando a cabo estudios de alta resolución sobre los cambios en la fauna de foraminíferos bentónicos en el Holoceno. El ecosistema marino frente a Perú central presenta las condiciones oceanográficas y sedimentarias adecuadas para la preservación de las testas calcáreas en el registro fósil así como los gradientes biogeoquímicos necesarios para observar la respuesta de las especies de foraminíferos bentónicos. Por tanto, el presente estudio servirá para identificar especies indicadoras del estado de óxido-reducción en el sedimento superficial a partir de un estudio ecológico y su aplicación en un registro sedimentario del último par de siglos.

¹ Departamento de Geoquímica, Universidad Federal Fluminense, Niterói, Brasil

² Facultad de Ciencias y Filosofía, Programa Maestría en Ciencias del Mar, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Av. Honorio Delgado 430, Lima 31, Perú

³ Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, Instituto del Mar del Perú, Av. Gamarra y Gral. Valle, s/n, Chucuito, Callao, Perú

⁴ LMI Paleotracas & UMR LOcéAN, Centre Bondy, IRD

⁵ INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja jorge.cardich.s@uch.pe

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el margen continental superior frente a Perú central, en el área comprendida entre los 12° y 14.2° S. Las muestras se colectaron en cruceros multidisciplinarios pertenecientes a dos proyectos del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) entre 2009 y 2011. El equipo usado para la obtención de las muestras del fondo marino fue un mini-multisacatestigos (MUC). En todas las estaciones, los testigos destinados para la medición de fitopigmentos fueron cortados cada 0.5 cm hasta los dos primeros centímetros y luego cada centímetro hasta los diez centímetros.

Las muestras fueron guardadas en sobres de hojas de aluminio y congeladas a -20° C. Del nivel superficial de una de las réplicas de fitopigmentos, se tomaron alrededor de 0.5 g de sedimento húmedo para el análisis de carbono total (%C) y el nitrógeno total (%N). El agua intersticial fue extraída de al menos los dos primeros centímetros de sedimento en cada estación. Dos mililitros del agua extraída de cada submuestra son preservados en frascos con 0.5 mL de acetato de zinc al 5% (fijador de H₂S) y refrigerados hasta su análisis.

Las muestras de la aplicación paleoceanográfica correspondieron a un testigo de sedimento recuperado frente a Callao en un punto muy cercano a la estación E5 de la plataforma externa frente a Callao (B0405-13; 12°00.78' S, 77°42.64' W; 184 m de profundidad). El testigo de sedimento fue obtenido con un Sacatestigos de Caja tipo Soutar (140 x 19.6 x 19.6 cm). Luego del muestreo, se refrigeró el testigo entre 3 y 4 ° C durante 60 días. El submuestreo y análisis está descrito en Morales *et al.* (2007).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Calibración del Proxy

Tomando en cuenta la intensa demanda de oxígeno en sedimentos costeros con alta carga de materia orgánica (Naqvi *et al.*, 2006; Levin *et al.*, 2009) y las concentraciones relativamente bajas de oxígeno de fondo, puede inferirse que los sedimentos frente a Callao y Pisco en el periodo de estudio se encontraron siempre bajo condiciones reductoras, aunque de diferente intensidad. La repartición espacial de las condiciones geoquímicas se puede visualizar de una mejor manera recreando artificialmente un gradiente

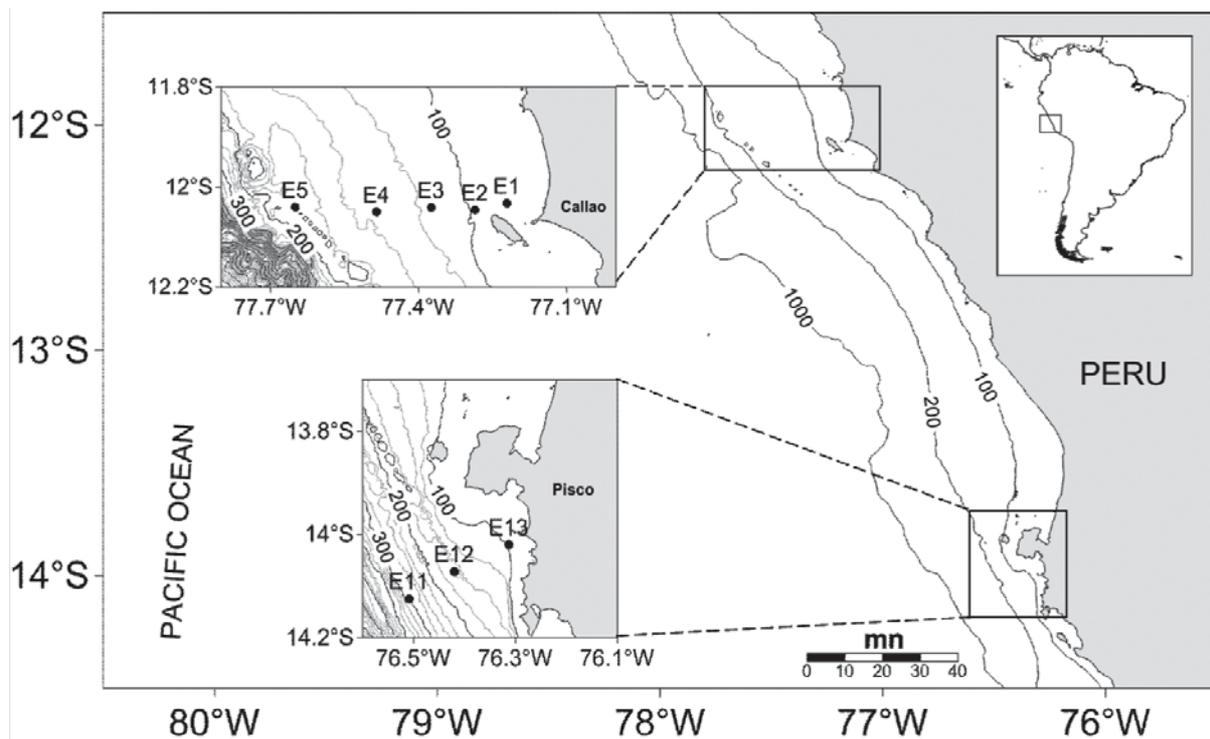


Figura 1. Mapa de las estaciones de muestreo.

de las condiciones de óxido-reducción en el sedimento a partir de los inventarios de H_2S en los dos centímetros superficiales (indicador de condiciones de óxido-reducción), los cuales fueron ordenados ascendientemente, integrando los cambios espacio-temporales.

La anoxia fue predominante en los sedimentos de la plataforma interna en esta tesis, como lo es usualmente frente a Perú central en las fases fría y neutral del ENSO (Gutiérrez *et al.*, 2008). Cerca de la costa usualmente se encontró material fitodetrítico muy fresco (altos valores de la razón de $Cl-a/Feop$) que está asociado a la condición de anoxia. Por otro lado, la predominancia de la postoxia en los sedimentos superficiales de la plataforma media y externa y el talud frente a Perú central es conocida. Sobre la plataforma externa donde predominaron las condiciones postóxicas, la materia orgánica presentó características de mayor preservación, debido a que es sometida a un proceso de descomposición menor a través de la columna de agua 'subóxica' (< 0.5 mL/L). Los resultados sugieren que la mayor preservación de la materia orgánica en el sedimento (mayores valores de COT y %N) se asocia a la condición de postoxia.

Las distribuciones espaciales de las asociaciones determinadas de las especies calcáreas más frecuentes mostraron una variación marcada respecto a los cambios en los parámetros ambientales como lo indica el ACC (Figura 2). Las asociaciones A y B siempre dominaron grandemente la comunidad de foraminíferos bentónicos a lo largo del gradiente. Hacia el extremo anóxico, la asociación A es más importante (> 60 %), mientras que bajo condiciones postóxicas, la asociación B dominó. Además, la asociación C estuvo presente prácticamente sólo bajo postoxia. La relación directa de las asociaciones a cada escenario ambiental es tentativa. Sin embargo, la presencia y abundancia de las asociaciones en las condiciones donde no son dominantes indican que las especies de cada asociación no están totalmente recluidas a una u otra condición de óxido-reducción. Pero a nivel específico, algunas especies aparecen como características. La asociación dominante bajo anoxia (asociación A), tuvo siempre a *B. costata* como la principal especie, seguida

por *N. auris*. La ocurrencia y abundancia de *B. costata* y *N. auris* parece estar mucho más ligada a la presencia de alimento fresco y a la alta producción de H_2S (Figura 2) que a la cantidad de alimento disponible. Las especies de la asociación B, *B. seminuda* y *B. tenuata*, presentaron una amplia distribución espacial y llegaron a co-dominar la comunidad bajo condiciones postóxicas, aunque en el talud superior como en el quiebre de la plataforma (en algunos periodos), *B. seminuda* fue claramente superior. Según Resig (1990), ambas especies forman parte del 'biofacies de la ZMO' frente a Perú central. La distribución de ambas especies no se restringió a la postoxia ya que estuvieron presentes también bajo anoxia (aunque con menor importancia). *Bolivina pacifica* y las demás especies de la asociación C ocurrieron con mucha mayor frecuencia e importancia bajo postoxia y mayor materia orgánica preservada (Figura 2).

APLICACIÓN PALEOCEANOGRÁFICA

Gutiérrez *et al.* (2009) determinaron un gran cambio en las condiciones de óxido-reducción en el sedimento del margen continental frente a Perú central en ca. 1820 AD relacionado al término de la Pequeña Edad de Hielo (PEH). Las fluctuaciones (enriquecimiento y agotamiento) de las concentraciones normalizadas de Mo y Cd en el testigo de sedimento B0405-13 pueden ser relacionadas a las condiciones de anoxia y postoxia definidas en esta tesis en relación a los inventarios de H_2S . La dinámica de los metales traza indicadores de condiciones redox y productividad considerados en Gutiérrez *et al.* (2009) (Mo y Cd) es importante para definir los cambios en las condiciones geoquímicas en el sedimento.

Las fuertes correlaciones positivas de *B. costata*, y *N. auris* en menor significancia, con Mo/Al (indicador de condiciones anóxicas) y Cd/Al (indicador de paleoproduktividad) (Tabla 13) agregan más evidencia de que estas especies sirven como indicadoras de anoxia en el sedimento. *B. pacifica* aparece con mayor robustez como la especie indicadora de las condiciones postóxicas en el sedimento. Esta especie mostró fuertes correlaciones totalmente opuestas a *B. costata* y *N. auris* en el testigo.

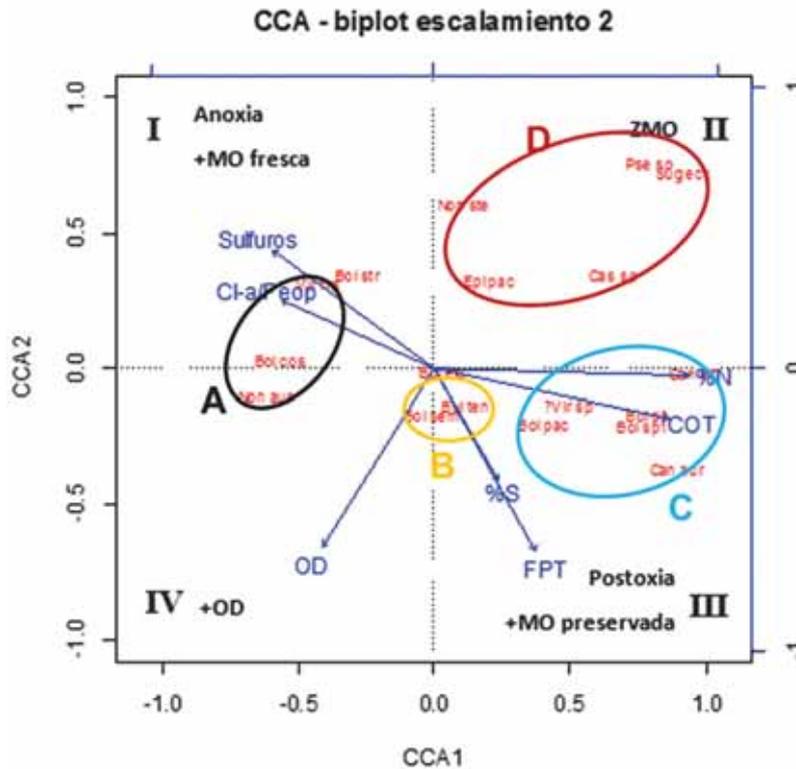


Figura 2. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC, escalamientos 2). Diagrama de los ejes CCA 1 y CCA 2 basados en los TSS de las especies calcáreas más importantes en las estaciones del margen continental frente a Callao (2009-2011) y Pisco (2010-2011); las variables ambientales se muestran adicionalmente como vectores. Bol cos = *Bolivina costata*; Non aur = *Nonionella auris*; Vir fra = *Virgulina fragilis*; Bol sem = *Bolivina seminuda*; Bul ten = *Buliminella tenuata*; Bol pac = *Bolivina pacifica*; Bol sp1 = *Bolivina* sp. 1; ?Vir sp = ?*Virgulina* sp.; Can inf = *Cancris inflatus*; Can aur = *Cancris auriculus*; Cas sp = *Cassidulina* sp.; Bul ele = *Buliminella elegantissima*; Non ste = *Nonionella stella*; Pse sp = *Pseudoaparrella* sp.; Sug eck = *Suggrunda eckisi*; Epi pac = *Epistominella pacifica*; Bol pli = *Bolivina plicata*; Bol str = *Bolivina* cf. *striatula*. MO = materia orgánica; OD = oxígeno disuelto de fondo.

CONCLUSIONES

En el margen continental frente a Perú central, la presencia y abundancia de los foraminíferos bentónicos está regida por las condiciones geoquímicas del sedimento superficial. Los factores geoquímicos que gobiernan estos indicadores comunitarios en esta área son la concentración de sulfuros libres y la calidad del alimento. Como resultado de esta validación, dos asociaciones de especies de foraminíferos bentónicos indicadoras de dos condiciones distintas de óxido-reducción han sido identificadas para los sedimentos del margen continental frente a Perú central. Las especies *Bolivina costata*, *Nonionella auris* y *Virgulina fragilis* (asociación A) son características de sedimentos anóxicos, asociados a alimento muy fresco, típicos de la zona costera. En el lado opuesto, las especies de la asociación C, liderada largamente por *Bolivina pacifica*, son características de postoxia en el sedimento, asociada a materia orgánica preservada

El registro sedimentario de los foraminíferos bentónicos calcáreos asociado a indicadores geoquímicos de óxido-reducción ratifica la caracterización ecológica moderna de las principales especies indicadoras. De esta forma, la composición de foraminíferos bentónicos

calcáreos reflejó la variabilidad decadal en las condiciones del hábitat bentónico en los últimos 200 años frente a Perú central.

BIBLIOGRAFÍA

- Gutiérrez D, Enríquez E, Purca S, Quipúzcoa L, Marquina R. & Graco M. (2008) - Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response. *Prog Oceanogr.*, p. 79:177-189.
- Gutiérrez D, Sifeddine A, Field D, Ortlieb L, Vargas G. & Chávez F, et al. (2009) - I Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences.* 6:835-848 p.
- Levin LA, Ekau W, Gooday AJ, Jorissen F, Middelburg JJ, Naqvi W, Neira C, Rabalais NN. & Zhang J. (2009) Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos. *Biogeosci Discuss.* 6:3563-3654 p.
- Morales M, Field D, Mayor S, Gutiérrez D, Sifeddine A, Ortlieb L, et al. (2007) - Variations in foraminifera over the last 460 years from laminated sediments off the coast of Peru. *Bol Soc Geol Peru.* p. 101:5-18.
- Naqvi SWA, Naik H, Pratihary A, D'Souza W, Narvekar PV, Jayakumar DA, Devol AH, Yoshinari T, Saino T. (2006) - Coastal versus open-ocean denitrification in the Arabian Sea. *Biogeosci Discuss.* 3:665-695 p.