



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA
ESCUELA DE POSGRADO VÍCTOR ALZAMORA CASTRO

“FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS ASOCIADOS A
CONDICIONES DE HIPOXIA COSTERA Y BAJO
pH EN LA BAHÍA DE PARACAS”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DEL MAR

LANDER MERMA MORA

LIMA – PERÚ

2016

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS

Dr. Bruno Turcq (Presidente)

MSc Ernesto Fernández Johnston (Secretario)

Dr. Pedro Tapia Ormeño (Vocal)

ASESOR DE LA TESIS

Dr. Dimitri Gutiérrez Aguilar

Coordinador del programa de Maestría en Ciencias del Mar – UPCH

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) y su programa de financiamiento de becas de postgrado, así como a la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH) y al Instituto del Mar del Perú (IMARPE) por el respaldo para la realización de esta tesis.

Un especial agradecimiento a mi asesor, el Dr. Dimitri Gutiérrez, por todo el tiempo brindado, su apoyo, sus sabios consejos y su paciencia.

Al proyecto Borde Costero del IMARPE dentro del cual se hizo posible esta tesis. Agradezco especialmente a la MSc Sonia Sánchez y la Blg. Nelly Jacobo por su constante disposición para colaborar con la información y los datos generados en el proyecto.

A todos los integrantes del Laboratorio de Bentos Marino del IMARPE, (Luis Quipúzcoa, Robert Marquina, Víctor Aramayo y Dennis Romero) por todo el apoyo, consejos, ambiente acogedor y amistad brindados. Gracias Lucho y Robert por su apoyo en el trabajo de campo. Gracias, Dennis, por tu colaboración y enseñanza sobre el estudio de los foraminíferos. Agradezco también a Jorge Cardich por resolver mis dudas en este campo de estudio.

Al equipo de profesionales de los laboratorios de Geología Marina, Hidroquímica y Fitoplancton del IMARPE, por su colaboración en los análisis realizados en este trabajo. En especial a los Ing. Federico Velazco y Juana Solís por los análisis de sedimentos. Al Ing. Jesús Ledesma y a la Dra. Michelle Graco por su colaboración con algunos equipos de trabajo de campo; y también a Wilson Carhuapoma, quien

aparte de ser un gran colaborador que siempre está dispuesto a enseñar los métodos de laboratorio y fundamentos químicos, es un buen amigo.

A todos mis compañeros de la Maestría en Ciencias del Mar por su apoyo moral, sus consejos, opiniones y buena compañía. En especial a Kathy y Edgart. Los mejores momentos en el tiempo de la maestría sin duda los pasé con todos ustedes.

A la empresa Inversiones Prisco en Atenas, Paracas, y sus instalaciones, embarcación y personal que hicieron posible el monitoreo en campo. Gracias “Fuji” y “Bigote” por el trabajo y la comida. Agradezco también a las empresas ERM y PLUSPETROL por facilitarme datos importantes que complementaron la información obtenida en campo.

Finalmente agradezco sobremanera a mis padres por haberme brindado las condiciones adecuadas para estudiar y desarrollarme académicamente, así como a mis hermanos por su compañía y su constante estímulo.

RESUMEN

Entre noviembre de 2014 y julio de 2015 se estudió el régimen del pH y la oxigenación del agua de fondo y su influencia sobre la composición y estructura de la comunidad de foraminíferos bentónicos en los sedimentos fangosos de la Bahía de Paracas (13° 50' S aprox.). Para ello, se analizó la variación espacial y temporal del oxígeno disuelto (OD), el pH y otras variables abióticas del agua de fondo y de los sedimentos superficiales en nueve estaciones de muestreo distribuidas tanto al interior de la bahía como fuera de ella. Se evaluó también los cambios espacio-temporales de la diversidad, composición y abundancia de la comunidad de foraminíferos, así como la abundancia de testas calcáreas vacías (muertos). Se encontró que las condiciones de hipoxia y de pH más bajo en el agua de fondo se presentan en el verano, cuando la sedimentación de la materia orgánica y la frecuencia de eventos de estratificación son mayores. Sin embargo, el pH intersticial tiende a disminuir entre invierno y primavera, posiblemente influenciado por la mayor oxigenación de los sedimentos, generando condiciones potencialmente más favorables a la disolución de los carbonatos biogénicos en ese periodo. En la Bahía de Paracas, la comunidad de foraminíferos bentónicos presentó una baja riqueza de especies con el predominio del grupo calcáreo hialino, la ausencia de especies calcáreas aporcelanadas y la escasa presencia de especies aglutinadas. Los resultados sugieren que bajo condiciones persistentes de bajo pH en el agua intersticial entre invierno y primavera, se presentan menores abundancias de las especies calcáreas y mayor representación de especies de testa calcárea robusta y de especies no calcáreas en la comunidad. Por último, *Buliminella elegantissima* y *Bolivina costata* son las especies más tolerantes a bajos niveles de pH en el agua intersticial en la Bahía de Paracas, por lo cual su dominancia en la comunidad es indicadora de condiciones favorables a la disolución de las testas.

Palabras clave

Foraminíferos bentónicos, hipoxia costera, anoxia, pH, disolución de testas calcáreas, Bahía Paracas.

ABSTRACT

Between November 2014 and July 2015, the benthic regime of pH and the bottom water oxygenation, and their influence on the composition and community structure of benthic foraminifera were studied in the muddy sediments of the Paracas Bay (13° 50' S aprox.). For this, the spatial and temporal changes of dissolved oxygen (DO), pH and other abiotic variables of bottom waters and surface sediments were analyzed in nine sampling stations distributed both inside and outside the bay. Spatial and temporal changes in diversity, composition and abundance on the community of benthic foraminifera were also analyzed as well as the abundance of empty calcareous tests (dead specimens). It was found that conditions of hypoxia and lower pH in the bottom water occurred in summer when the sedimentation of organic matter and the frequency of stratification events were greater. However, pore water pH tended to decrease between winter and spring, possibly influenced by sediment oxygenation, generating potentially more favorable conditions to dissolution of biogenic carbonates in that period. In Paracas Bay, the community of benthic foraminifera had low species richness with the predominance of hyaline calcareous group and the absence of porcelaneous species and the scarcity of agglutinated species. Our results suggest that under persistent low pH conditions in pore water between winter and spring, the community of benthic foraminifera presents lower abundances of calcareous species and dominances of both robust calcareous tests and non-calcareous species. Finally, *Buliminella elegantissima* and *Bolivina costata* are the most tolerant species to low pH conditions in sediment pore waters of Paracas Bay, so their dominance in the community is indicative of favorable conditions to dissolution of carbonates in the sediments.

Key words

Benthic foraminifera, coastal hypoxia, anoxia, pH, dissolution of calcareous tests, Paracas Bay.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1. Planteamiento del problema	3
2.2. Marco Teórico	5
2.2.1. Hipoxia costera.....	5
2.2.2. Escalas de la hipoxia	6
2.2.3. Dinámica del carbono inorgánico disuelto del océano y condiciones de bajo pH en sistemas costeros	8
2.2.4. Respiración aeróbica y solubilidad de los carbonatos en sedimentos superficiales	11
2.2.5. Foraminíferos bentónicos.....	13
2.2.5.1. Características generales de los foraminíferos bentónicos	13
2.2.5.2. Comunidades de foraminíferos bentónicos y factores ambientales.....	15
2.2.5.3. Foraminíferos bentónicos en ambientes someros	19
2.3. Justificación de la investigación.....	21
2.4. Objetivos	23
2.4.1. Objetivo general	23
2.4.2. Objetivos específicos	23
2.5. Hipótesis:.....	24
3. METODOLOGÍA	25
3.1. Descripción del área de estudio.....	25
3.2. Diseño del estudio	27
3.2.1. Tipo de estudio	27
3.2.2. Población de estudio	27
3.2.3. Operacionalización de las variables	27
3.2.3.1. Variables explicativas	27
3.2.3.2. Variables respuesta	28
3.2.4. Diseño de muestreo	29
3.3. Procedimientos y técnicas	31
3.3.1. Muestreo y medición de variables en columna de agua.....	31
3.3.2. Muestreo de sedimentos y agua intersticial	32

3.3.3.	Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno	33
3.3.4.	Determinación de propiedades geoquímicas del sedimento	34
3.3.5.	Determinación de concentración de sulfuros en agua el intersticial. 35	
3.3.6.	Análisis de muestras biológicas	35
3.3.6.1.	Tratamiento de las muestras	35
3.3.6.2.	Análisis de los foraminíferos de testas calcáreas.....	36
3.4.	Plan de análisis	37
3.4.1.	Contrastación de la hipótesis 1.....	38
3.4.2.	Contrastación de la hipótesis 2.....	39
4.	RESULTADOS	40
4.1.	Estudio de la variabilidad espacio estacional	40
4.1.1.	Variables fisicoquímicas de columna de agua	40
4.1.2.	Variables sedimentarias	48
4.1.2.1.	Textura del sedimento.....	48
4.1.2.2.	Propiedades geoquímicas del sedimento	49
4.1.3.	Variables del agua intersticial	51
4.1.3.1.	Sulfuros.....	51
4.1.3.2.	pH.....	52
4.1.4.	Foraminíferos bentónicos.....	54
4.1.4.1.	Características y variabilidad de la comunidad de foraminíferos bentónicos 54	
4.1.4.2.	Variabilidad del grupo de foraminíferos no calcáneos.....	60
4.1.4.3.	Variabilidad del grupo de foraminíferos calcáneos.....	63
4.1.4.4.	Testas vacías de foraminíferos calcáneos.....	70
4.2.	Estudio temporal en la Bahía Paracas	75
4.2.1.	Variabilidad en Puerto San Martín.....	75
4.2.2.	Exposición a la hipoxia y al bajo pH frente a Puerto San Martín ...	80
4.2.3.	Seguimiento de estación fija en la bahía	82
4.2.3.1.	Variabilidad de la temperatura.....	82
4.2.3.2.	Variabilidad del oxígeno disuelto	82
4.2.3.3.	Variabilidad del pH.....	83
4.2.3.4.	Variabilidad de la demanda bioquímica de oxígeno.....	83
4.2.3.5.	Variabilidad de las propiedades geoquímicas del sedimento..	87

4.2.3.6.	Variables del agua intersticial.....	88
4.2.3.7.	Foraminíferos bentónicos	90
4.3.	Análisis de correlación entre las variables	94
5.	DISCUSIÓN	97
5.1.	Ecología y distribución de los foraminíferos bentónicos en ambientes someros eutróficos.....	97
5.1.1.	Parámetros comunitarios y composición de los foraminíferos bentónicos	97
5.1.2.	Distribución y asociación de las especies calcáreas en los sedimentos someros	98
5.2.	Dinámica física, hipoxia y bajo pH en la bahía de Paracas.....	103
5.2.1.	Surgencias costeras y temperatura en la bahía de Paracas	103
5.2.2.	Dinámica temporal de la hipoxia costera y la anoxia en la bahía de Paracas	104
5.2.3.	Dinámica del pH en el agua de fondo y en los sedimentos.....	106
5.3.	Efecto de la biogeoquímica de sedimentos de ambientes someros sobre los foraminíferos bentónicos calcáreos	114
5.3.1.	Preservación y disolución del carbonato de calcio (CaCO ₃) en sedimentos someros	114
5.3.2.	Foraminíferos bentónicos calcáreos en ambientes sedimentarios favorables a la disolución de carbonatos	116
5.3.3.	Implicancias en la interpretación de los registros sedimentarios..	121
6.	CONCLUSIONES	123
7.	RECOMENDACIONES.....	125
8.	REFERENCIAS.....	126
9.	ANEXOS	135

LISTA DE TABLAS

- TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO. PROF. = PROFUNDIDAD. ZONAS: INTERIOR DE BAHÍA (B), EXTERIOR SOMERO (S) Y EXTERIOR PROFUNDO (P). 26
- TABLA 2. VARIABLES FISICOQUÍMICAS DE LA COLUMNA DE AGUA EN LAS ESTACIONES DE MUESTREO EN LAS CAMPAÑAS DE NOVIEMBRE (N) DE 2014, MARZO (M) Y JULIO (J) DE 2015. S/U: SIN UNIDAD. 47
- TABLA 3. CONTENIDO PORCENTUAL DE ARENAS, LIMOS Y ARCILLAS EN LOS SEDIMENTOS DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO EN LAS CAMPAÑAS DE NOVIEMBRE (N) DE 2014, MARZO (M) Y JULIO (J) DE 2015. 49
- TABLA 4. CONTENIDO PORCENTUAL DE MATERIA ORGÁNICA (MOT) Y CARBONATOS (CaCO_3) DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO EN LAS CAMPAÑAS DE NOVIEMBRE (N) DE 2014, MARZO (M) Y JULIO (J) DE 2015. 50
- TABLA 5. CONTENIDO DE CLOROFILA A (CLA-A) Y RAZÓN CLOROFILA-A : FEOPIGMENTOS (CLA-A/FEOP) DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO EN LAS CAMPAÑAS DE NOVIEMBRE (N) DE 2014, MARZO (M) Y JULIO (J) DE 2015, EXPRESADOS COMO PROMEDIO ($N=2$) \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR. *=VALORES SIN RÉPLICA. S/U= SIN UNIDAD. 51
- TABLA 6. CONCENTRACIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO (H_2S) EN EL PRIMER CENTÍMETRO DEL SEDIMENTO, INVENTARIO DE CONCENTRACIONES DE SULFURO DE HIDRÓGENO DE LOS 5 PRIMEROS CENTÍMETROS Y PH DEL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO DE 6 ESTACIONES DE MUESTREO EN LAS CAMPAÑAS DE NOVIEMBRE (N) DE 2014, MARZO (M) Y JULIO (J) DE 2015. S/U= SIN UNIDAD. 52
- TABLA 7. ABUNDANCIAS RELATIVAS PROMEDIO (%) DE LAS ESPECIES DE FORAMINÍFEROS POR ZONA Y FRACCIÓN DE TAMAÑO EN EL ESTUDIO. 54

TABLA 8. DENSIDADES DE FORAMINÍFEROS (ABUNDANCIAS EN 50CM³ DE SEDIMENTO SUPERFICIAL) POR ESPECIE Y ESTACIÓN DE MUESTREO EN LA CAMPAÑA DE NOVIEMBRE DE 2014, EXPRESADOS COMO PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. *=ESPECIE PRESENTE EN UNA SOLA RÉPLICA. S: RIQUEZA DE ESPECIES. 56

TABLA 9. DENSIDADES DE FORAMINÍFEROS (ABUNDANCIAS EN 50CM³ DE SEDIMENTO SUPERFICIAL) POR ESPECIE Y ESTACIÓN DE MUESTREO EN LA CAMPAÑA DE MARZO DE 2014, EXPRESADOS COMO PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. *=ESPECIE PRESENTE EN UNA SOLA RÉPLICA. S: RIQUEZA DE ESPECIES. 57

TABLA 10 DENSIDADES DE FORAMINÍFEROS (ABUNDANCIAS EN 50CM³ DE SEDIMENTO SUPERFICIAL) POR ESPECIE Y ESTACIÓN DE MUESTREO EN LA CAMPAÑA DE JULIO DE 2014, EXPRESADOS COMO PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. *=ESPECIE PRESENTE EN UNA SOLA RÉPLICA. S: RIQUEZA DE ESPECIES. 58

TABLA 11. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES ESPECIES CALCÁREAS DEL ESTUDIO 66

TABLA 12. DENSIDAD (ABUNDANCIA EN 50CM³ DE SEDIMENTO SUPERFICIAL) DE TESTAS CALCÁREAS VACÍAS POR ESTACIÓN Y CAMPAÑAS DE MUESTREO EXPRESADOS COMO PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. 72

TABLA 13. RAZÓN DEL NÚMERO DE TESTAS CALCÁREAS VACÍAS ENTRE EL NÚMERO DE TESTAS CALCÁREAS TOTALES, POR ESTACIÓN Y CAMPAÑAS DE MUESTREO: PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. 72

TABLA 14. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (5 DÍAS DE INCUBACIÓN) DE MUESTRAS DE AGUA DE LA SUPERFICIE Y FONDO DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO 83

TABLA 15. DENSIDAD DE FORAMINÍFEROS (ABUNDANCIAS POR 50CM³) POR ESPECIE DEL MONITOREO EXPRESADOS COMO PROMEDIO (N=2) ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR. *=ESPECIE PRESENTE EN UNA SOLA RÉPLICA 92

TABLA 16. ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE RANGO DE SPEARMAN ENTRE LOS DATOS DE LAS VARIABLES ABIÓTICAS DE TODO EL ESTUDIO, APLICÁNDOSE LA CORRECCIÓN DE BONFERRONI DE COMPARACIONES MÚLTIPLES. SE PRESENTAN LOS COEFICIENTES DE LAS CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$) Y EL NÚMERO DE DATOS EMPLEADOS (N) EN LA CORRELACIÓN. T: TEMPERATURA. SAL: SALINIDAD. OXI: OXÍGENO DISUELTO. CHL-A: CLOROFILA-A. MOT: MATERIA ORGÁNICA TOTAL. PH INT.: PH INTERSTICIAL. 95

TABLA 17. ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE RANGO DE SPEARMAN ENTRE LAS VARIABLES ABIÓTICAS Y LAS VARIABLES DE LA COMUNIDAD DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS, APLICÁNDOSE LA CORRECCIÓN DE BONFERRONI DE COMPARACIONES MÚLTIPLES. SE PRESENTAN LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVOS ($P < 0.1$, * $P < 0.05$) Y ENTRE PARÉNTESIS EL NÚMERO DE DATOS EMPLEADOS EN LA CORRELACIÓN. S: RIQUEZA DE ESPECIES. N: ABUNDANCIA (IND/50CM³ DE SEDIMENTO SUPERFICIAL). CALC.: CALCÁREOS. CHL-A: CLOROFILA-A. MOT: MATERIA ORGÁNICA TOTAL. PH INT.: PH INTERSTICIAL. 96

TABLA 18. LISTA DE LA RIQUEZA TOTAL DE ESPECIES (S) Y LA PARTICIPACIÓN RELATIVA DE LOS GRUPOS ECOLÓGICOS EN COMUNIDADES DE FORAMINÍFEROS REPORTADOS EN DIFERENTES AMBIENTES SOMEROS. * = NO ESPECIFICADO. 102

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. ESCALAS Y TIPOLOGÍA DE LOS SISTEMAS HIPÓXICOS (MODIFICADO DE RABALAIS ET AL. 2009). LOS COLORES ROJO Y VERDE REPRESENTAN LA INFLUENCIA DE FACTORES ANTROPOGÉNICOS Y NATURALES RESPECTIVAMENTE. 8
- FIGURA 2. MODELO CONCEPTUAL TROX (ADAPTADO DE JORISSEN ET AL. (1995)). 18
- FIGURA 3. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO EN LA BAHÍA DE PARACAS Y ZONA EXTERIOR. 26
- FIGURA 4. MUESTREADOR DE SEDIMENTOS HAPS CORER USADO EN EL ESTUDIO ESPACIO ESTACIONAL. 33
- FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DE FONDO EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN LAS TRES CAMPAÑAS DE MUESTREO. (*) ESTACIONES DE SEDIMENTOS Y COLUMNA DE AGUA (+) ESTACIONES DE COLUMNA DE AGUA. 43
- FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SALINIDAD DE FONDO EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN LAS TRES CAMPAÑAS DE MUESTREO. (*) ESTACIONES DE SEDIMENTOS Y COLUMNA DE AGUA (+) ESTACIONES DE COLUMNA DE AGUA. 44
- FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL OXÍGENO DE FONDO EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN LAS TRES CAMPAÑAS DE MUESTREO. EN CÍRCULOS: VALORES SUPERPUESTOS DE H₂S DEL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO EN ALGUNAS ESTACIONES DE SEDIMENTOS. (*) ESTACIONES DE SEDIMENTOS Y COLUMNA DE AGUA. (+) ESTACIONES DE COLUMNA DE AGUA. 45
- FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL PH DE FONDO EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN LAS TRES CAMPAÑAS DE MUESTREO. EN CÍRCULOS: VALORES SUPERPUESTOS DE PH INTERSTICIAL DEL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO EN ALGUNAS ESTACIONES DE SEDIMENTOS. (*) ESTACIONES DE SEDIMENTOS Y COLUMNA DE AGUA. (+) ESTACIONES DE COLUMNA DE AGUA. 46

FIGURA 9. NIVELES DE SULFURO DE HIDRÓGENO (NMOL CM^{-3}) Y PH DEL AGUA INTERSTICIAL DEL PRIMER CENTÍMETRO DEL SEDIMENTO Y NIVELES DE PH EN EL AGUA DE FONDO EN LAS ESTACIONES Y TEMPORADAS DE ESTUDIO. 53

FIGURA 10. ABUNDANCIAS (N° DE INDIVIDUOS X 50CM^3) DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE FORAMINÍFEROS DEL CENTÍMETRO SUPERFICIAL DEL SEDIMENTO, POR ESTACIÓN DE MUESTREO Y TEMPORADA DE MUESTREO, EN LAS FRACCIONES DE TAMAÑO DE $150\text{-}500\ \mu\text{M}$ (IZQUIERDA) Y DE $63\text{-}150\ \mu\text{M}$ (DERECHA). 59

FIGURA 11. REPRESENTACIÓN EN PORCENTAJE DE LAS ABUNDANCIAS DE LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS POR GRUPO ECOLÓGICO, DEL TOTAL DE LA COMUNIDAD, EN LOS MESES DE MUESTREO 61

FIGURA 12. ABUNDANCIAS RELATIVAS (%) DE LOS GRUPOS ECOLÓGICOS EN LA COMUNIDAD TOTAL DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DEL CENTÍMETRO SUPERFICIAL DEL SEDIMENTO POR ESTACIÓN Y TEMPORADA DE MUESTREO. 61

FIGURA 13. ABUNDANCIAS RELATIVAS DE FORAMINÍFEROS NO CALCÁREOS RESPECTO AL FACTOR TIEMPO (CAMPAÑAS) Y AL FACTOR ESPACIO (ZONA) EN LAS DOS FRACCIONES DE TAMAÑO (ARRIBA: $150\text{-}500\ \mu\text{M}$, ABAJO: $63\text{-}150\ \mu\text{M}$). 62

FIGURA 14. ABUNDANCIAS (N° DE INDIVIDUOS X 50CM^3) DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS CALCÁREOS DEL CENTÍMETRO SUPERFICIAL DEL SEDIMENTO, POR ESTACIÓN DE MUESTREO Y TEMPORADA DE MUESTREO, EN LAS FRACCIONES DE TAMAÑO DE $150\text{-}500\ \mu\text{M}$ (IZQUIERDA) Y DE $63\text{-}150\ \mu\text{M}$ (DERECHA). 65

FIGURA 15. DENDROGRAMA DE SIMILARIDAD (BRAY-CURTIS) EN BASE AL ANÁLISIS CLUSTER EN MODO Q DE LAS ABUNDANCIAS RELATIVAS DE LAS ESPECIES CALCÁREAS 67

FIGURA 16 . DENDROGRAMA DE SIMILARIDAD (BRAY-CURTIS) EN BASE AL ANÁLISIS CLUSTER EN MODO R DE LAS ABUNDANCIAS RELATIVAS DE LAS ESPECIES CALCÁREAS 67

FIGURA 17. DENDROGRAMA DE SIMILARIDAD (ÍNDICE DE JACCARD) EN BASE AL ANÁLISIS CLUSTER EN MODO R DE LOS DATOS DE PRESENCIA/AUSENCIA DE LAS ESPECIES CALCÁREAS 68

FIGURA 18. PROPORCIÓN DE LOS FORAMINÍFEROS CALCÁREOS ROBUSTOS DEL TOTAL DE FORAMINÍFEROS CALCÁREOS RESPECTO AL FACTOR TIEMPO (CAMPAÑAS) Y AL FACTOR ESPACIO (ZONA) EN LAS DOS FRACCIONES DE TAMAÑO. 69

FIGURA 19. NÚMERO DE TESTAS CALCÁREAS VACÍAS RESPECTO AL FACTOR TIEMPO (CAMPAÑAS) Y AL FACTOR ESPACIO (ZONA) EN LAS DOS FRACCIONES DE TAMAÑO 73

FIGURA 20. PROPORCIÓN DE LAS TESTAS CALCÁREAS VACÍAS DEL TOTAL DE TESTAS CALCÁREAS (VIVOS Y MUERTOS) RESPECTO AL FACTOR TIEMPO (CAMPAÑAS) Y AL FACTOR ESPACIO (ZONA) EN LAS DOS FRACCIONES DE TAMAÑO. 74

FIGURA 21. SERIE DIARIA DE TEMPERATURA A 5 METROS DE PROFUNDIDAD FRENTE A PUERTO SAN MARTÍN (LÍNEA NEGRA) DEL PROGRAMA SRT DE PLUSPETROL. DIFERENCIA ENTRE TEMPERATURA SUPERFICIAL Y A 5 METROS DE PROFUNDIDAD (LÍNEA AZUL). CLIMATOLOGÍA MENSUAL DE LA TEMPERATURA A 5 METROS DE PROFUNDIDAD (LÍNEA ROJA), BASADA EN EL PERIODO 2006 - 2015. LAS BANDAS INDICAN EL PERIODO DE DURACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO ESPACIO-ESTACIONAL Y LOS PUNTOS NEGROS, LOS DÍAS DE MUESTREO EN EL MONITOREO. 77

FIGURA 22. SERIE DIARIA DE OXÍGENO DISUELTO A 5 METROS DE PROFUNDIDAD FRENTE A PUERTO SAN MARTÍN (LÍNEA NEGRA) DEL PROGRAMA SRT DE PLUSPETROL. CLIMATOLOGÍA MENSUAL DEL OXÍGENO A 5 METROS DE PROFUNDIDAD (LÍNEA ROJA), BASADA EN EL PERIODO 2006 - 2015. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA EL VALOR DE OXÍGENO DEL PERCENTIL 10 DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS. LAS BANDAS INDICAN EL PERIODO DE DURACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO ESPACIO-ESTACIONAL Y LOS PUNTOS NEGROS, LOS DÍAS DE MUESTREO EN EL MONITOREO. 78

FIGURA 23. SERIE DIARIA DE PH A 5 METROS DE PROFUNDIDAD FRENTE A PUERTO SAN MARTÍN (LÍNEA NEGRA) DEL PROGRAMA SRT DE PLUSPETROL. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA EL VALOR DE

PH DEL PERCENTIL 10 DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS. LAS BANDAS INDICAN EL PERIODO DE DURACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO ESPACIO-ESTACIONAL Y LOS PUNTOS NEGROS, LOS DÍAS DE MUESTREO EN EL MONITOREO. 79

FIGURA 24. NÚMERO DE DÍAS AL MES CON NIVELES DE OXÍGENO (ARRIBA) Y PH (ABAJO) MENORES AL PERCENTIL 10 DE LOS DATOS. 81

FIGURA 25. SERIE DE TIEMPO DE TEMPERATURA DE FONDO A FRECUENCIA HORARIA EN LA ESTACIÓN 4 DEL ESTUDIO EN 2015. 84

FIGURA 26. SERIE DE TIEMPO DE OXÍGENO DE FONDO A FRECUENCIA HORARIA EN LA ESTACIÓN 4 DEL ESTUDIO (LÍNEA GRIS) EN 2015. MEDICIONES DE OXÍGENO EN MUESTRAS DE AGUA (PUNTOS NEGROS). LÍMITE SUPERIOR DE LA HIPOXIA COSTERA (LÍNEA AZUL) 85

FIGURA 27. VALORES DE PH DE AGUA DE FONDO Y DE AGUA INTERSTICIAL DEL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO 86

FIGURA 28. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT), NITRÓGENO TOTAL (N) Y RAZÓN CARBONO:NITRÓGENO (C:N) EN EL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO 87

FIGURA 29. CONCENTRACIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO EN EL AGUA INTERSTICIAL DEL PRIMER CENTÍMETRO DE SEDIMENTO EN LA ESTACIÓN DE MONITOREO EN 2015. LOS PUNTOS SON MEDICIONES SIN RÉPLICA. 89

FIGURA 30. REPRESENTACIÓN EN PORCENTAJE DE LAS ABUNDANCIAS DE LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS POR FRACCIÓN DE TAMAÑO (IZQUIERDA) Y POR GRUPO ECOLÓGICO (DERECHA) DE TODAS LAS MUESTRAS DEL MONITOREO. 91

FIGURA 31. ABUNDANCIAS DE FORAMINÍFEROS CALCÁREOS DE LOS MUESTREOS MENSUALES EN EL PUNTO FIJO. 91

- FIGURA 32. ABUNDANCIAS RELATIVAS DE LOS GRUPOS ECOLÓGICOS DE LA COMUNIDAD DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DURANTE EL TIEMPO DE MONITOREO. 92
- FIGURA 33. ABUNDANCIAS POR ESPECIE DURANTE EL MONITOREO PARA LA FRACCIÓN DE MAYORES TAMAÑOS (ARRIBA) Y MENORES TAMAÑOS (ABAJO) 93
- FIGURA 34. PERFIL DE PH Y TEMPERATURA EN LA COLUMNA DE AGUA DE LA ESTACIÓN FIJA DE MONITOREO, EL 21 DE MARZO DE 2015. MEDICIÓN HECHA EN SUPERFICIE (0M), MEDIA AGUA (5M) Y FONDO (9M). 107
- FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN DE FOSFATOS EN EL AGUA DE FONDO EN LA BAHÍA DE PARACAS EN LOS MESES DE LAS CAMPAÑAS DE ESTUDIO (DATOS DE IMARPE, PROYECTO BORDE COSTERO 2014-2015) 111
- FIGURA 36. DISTRIBUCIÓN DE FOSFATOS EN EL AGUA DE FONDO EN LA BAHÍA DE PARACAS EN LOS MESES DE LAS CAMPAÑAS DE ESTUDIO (DATOS DE IMARPE, PROYECTO BORDE COSTERO 2014-2015). 112
- FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN DE LA RAZÓN N:P EN EL AGUA DE FONDO EN LA BAHÍA DE PARACAS EN LOS MESES DE LAS CAMPAÑAS DE ESTUDIO (DATOS DE IMARPE, PROYECTO BORDE COSTERO 2014-2015) 113

LISTA DE ANEXOS

- A1. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS PARA FONDO Y SUPERFICIE DE LA COLUMNA DE AGUA EN EL TOTAL DE ESTACIONES DEL PROYECTO BORDE COSTERO DEL IMARPE EN NOVIEMBRE DE 2014
- A2. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS PARA FONDO Y SUPERFICIE DE LA COLUMNA DE AGUA EN EL TOTAL DE ESTACIONES DEL PROYECTO BORDE COSTERO DEL IMARPE EN MARZO DE 2015
- A3. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS PARA FONDO Y SUPERFICIE DE LA COLUMNA DE AGUA EN EL TOTAL DE ESTACIONES DEL PROYECTO BORDE COSTERO DEL IMARPE EN JULIO DE 2015.
- A4. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS VARIABLES DE AGUA DE FONDO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEDASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.
- A5. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA TEXTURA DEL SEDIMENTO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEDASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.
- A6. ANÁLISIS DE VARIANZA DE PROPIEDADES GEOQUÍMICAS DEL SEDIMENTO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC

TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A7. ABUNDANCIAS RELATIVAS (%) DE FORAMINÍFEROS POR GRUPO ECOLÓGICO Y FRACCIÓN DE TAMAÑO EN LAS ESTACIONES Y LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO

A8. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA DIVERSIDAD (RIQUEZA) DE TODA LA COMUNIDAD DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS Y DE LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS CALCÁREOS DEL CENTÍMETRO SUPERFICIAL DE SEDIMENTO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A9. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA ABUNDANCIA DE TODA LA COMUNIDAD DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS Y DE LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS CALCÁREOS DEL CENTÍMETRO SUPERFICIAL DE SEDIMENTO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A10. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS NO CALCÁREOS EN CADA FRACCIÓN DE TAMAÑO ASÍ COMO EN TODA LA COMUNIDAD. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL

VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A11. (ARRIBA) ANÁLISIS DE KRUSKAL-WALLIS DE LA FRACCIÓN PORCENTUAL DE LOS FORAMINÍFEROS ROBUSTOS LA FRACCIÓN DE MAYOR TAMAÑO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $A < 0.1$ COMO RESULTADO DEL TEST POST HOC DE DUNN CON CORRECCIÓN DE BONFERRONI. (ABAJO) ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA FRACCIÓN PORCENTUAL DE LOS FORAMINÍFEROS ROBUSTOS LA FRACCIÓN DE MENOR TAMAÑO. SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $A < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A12. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA ABUNDANCIA (N) DE TESTAS CALCÁREAS VACÍAS Y DE LA PROPORCIÓN DE TESTAS VACÍAS DEL NÚMERO TOTAL DE TESTAS CALCÁREAS (%), EN CADA FRACCIÓN DE TAMAÑO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $A < 0.1$ (TUKEY HSD).

A13. ANÁLISIS DE VARIANZA DE NUTRIENTES EN EL AGUA DE FONDO. EL FACTOR ESPACIAL (Z = ZONA) TIENE TRES GRUPOS (B: BAHÍA INTERIOR, S: EXTERIOR SOMERO Y P: EXTERIOR PROFUNDO). EL FACTOR TEMPORAL (C = CAMPAÑA) TIENE 3 GRUPOS (N: NOVIEMBRE, M: MARZO Y J: JULIO). SE MUESTRAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA $A < 0.1$ COMO RESULTADOS DEL TEST POST HOC TUKEY HSD. SE INCLUYE EL VALOR P DE LA PRUEBA DE HOMOCEASTICIDAD DE FLIGNER-KILLEEN. N.S.: NO SIGNIFICATIVO.

A14. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ABUNDANCIAS (IND/ 50 CM³) DE LAS PRINCIPALES ESPECIES CALCÁREAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

A15. FOTOGRAFÍA DEL FENÓMENO DE “AGUAS BLANCAS” O “AGUAS LECHOSAS” EN LA BAHÍA DE PARACAS, TOMADA EL 29 DE MARZO DE 2015 (CORTESÍA DE E. FLORES).

A16. FOTOGRAFÍAS BAJO EL MICROSCOPIO ESTEREOSCÓPICO DE ESPECIES DE FORAMINÍFEROS ‘FRÁGILES’ CON EVIDENCIAS DE DISOLUCIÓN PARCIAL DE SUS TESTAS: 1) VIRGULINELLA FRAGILIS. 2) NONIONELLA AURIS. 3) AMMONIA SP. LAS FLECHAS SEÑALAN LAS CÁMARAS DE LAS TESTAS AFECTADAS POR LA DISOLUCIÓN.

1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes marinos costeros albergan una gran diversidad de especies y sostienen muchas actividades económicas gracias a su mayor productividad que la zona oceánica. Además de estas características, los ambientes costeros también pueden presentar condiciones ambientales desfavorables para muchos de los organismos que los habitan. Una de esas condiciones, si no es la más conocida, es la hipoxia.

Se conoce como hipoxia costera a la condición en la que la concentración de oxígeno disuelto ha disminuido hasta niveles que no hacen posible la existencia de la mayor parte de la vida animal en ambientes marinos costeros (Diaz 2001). La hipoxia en estos ambientes se presenta como eventos de duración de unas cuantas horas al día hasta semanas o meses. Su principal origen es la eutrofización como proceso antropogénico, aunque también puede desarrollarse naturalmente (Rabalais et al. 2010). El mecanismo que lo genera es la respiración de la materia orgánica que, debido a la eutrofización, se produce en grandes cantidades en las floraciones algales. Este mismo proceso genera la producción de CO₂ como resultado del metabolismo aeróbico, y con ello, la disminución de los niveles de pH (Burnett 1997). Esto supone que durante los eventos de hipoxia severa los organismos no solo se estarían enfrentando a la falta de oxígeno sino también a condiciones de pH bajo (pH < 7.8; Copin-Montégut 1996).

De todos los organismos, los que pertenecen al bentos son los primeros en verse afectados por el desarrollo de la hipoxia costera debido a su limitado movimiento para evadirla y su asociación al sedimento (Rabalais & Turner 2001). Los efectos

de la interacción entre la hipoxia y el bajo pH sobre el bentos en general han sido poco estudiados, pero se darían en todos los niveles de organización (fisiológico, poblacional y comunitario) de los organismos. Algunos estudios experimentales, por ejemplo, plantean que el oxígeno y el CO₂ (bajo pH) tendrían efectos profundos e independientes en la fisiología de muchos macro-crustáceos, generando incluso el deterioro de su sistema inmunológico haciéndolos más susceptibles al ataque de patógenos (Burnett 1997; Burnett & Stickle 2001). Sin embargo, los organismos calcificantes del bentos, son particularmente sensibles al aumento de la acidez del agua debido a la disolución de sus estructuras externas de CaCO₃.

Entre los organismos bentónicos, los foraminíferos constituyen un grupo muy importante debido a su abundancia, diversidad y porque están presentes en casi todo tipo de ambiente bentónico. Muchos de ellos presentan conchillas (testas) de carbonato de calcio, motivo por el cual serían también susceptibles a cambios en los niveles de pH en el medio marino. Además, los foraminíferos bentónicos son considerados potentes indicadores ambientales que los hacen útiles herramientas en estudios paleoceanográficos.

El presente estudio tiene por finalidad evaluar la influencia de la variabilidad del pH y oxígeno del agua de fondo sobre la composición y estructura de la comunidad de foraminíferos bentónicos en los sedimentos fangosos de la Bahía de Paracas. Para ello, se caracterizaron los cambios espaciales y temporales de los factores ambientales y de la comunidad de foraminíferos bentónicos en términos de abundancia, diversidad y composición de especies. El presente estudio busca contribuir con el conocimiento del efecto sinérgico y posibles mecanismos de control del pH y el oxígeno sobre estos organismos.

2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del problema

En general, es de esperar que los ambientes marinos de poca profundidad (menor a 20 metros) tengan aguas bien mezcladas, y por lo tanto, bien oxigenadas por el intercambio gaseoso con la atmósfera (Booth et al. 2012). Sin embargo, la hipoxia puede originarse en ambientes costeros de profundidades incluso menores a 2 metros, siendo los estuarios los principales ejemplos (Rabalais et al. 2010).

Un ejemplo de ambiente marino poco profundo es la Bahía de Paracas, la cual está ubicada en una zona de la costa peruana que presenta una marcada estacionalidad en la temperatura superficial del mar y la productividad primaria debido a la influencia de las surgencias costeras y su régimen estacional. Así mismo, gracias a la geomorfología semi-cerrada que presenta, la hidrodinámica es poco intensa en el fondo y permite la deposición y acumulación de fangos de materia orgánica en los sedimentos (Velazco & Solís 2000). También, por ser muy productiva, la bahía alberga no solo una gran diversidad de especies sino también actividades de extracción y cultivo de recursos hidrobiológicos (Cabello et al. 2002; Aguirre-Velarde et al. 2016).

Sin embargo, se han reportado episodios de hipoxia e incluso anoxia, en la bahía, que ocasionaron la mortandad de muchas especies, sobre todo las que tienen como hábitats el agua de fondo o el sedimento (Cabello et al. 2002). Los resultados del monitoreo del oxígeno de fondo en la bahía muestran que los eventos de hipoxia se

presentan, de manera más prolongada e intensa, en los meses de verano (Aguirre-Velarde et al. 2014, 2016).

Ya que el desarrollo de la hipoxia produce CO_2 como resultado del metabolismo aeróbico, y que esto a su vez disminuye el pH, los ambientes marino-costeros que presentan condiciones hipóxicas, como la Bahía de Paracas, también presentan condiciones de bajo pH. La combinación de niveles de pH más bajos de lo normal (< 7.8 ; Copin-Montégut 1996) y condiciones de hipoxia, representa un reto ambiental para los organismos que viven en los ambientes costeros. Pese a todo esto, en la Bahía de Paracas no se ha evaluado el régimen del pH y se desconoce sus posibles efectos sobre los organismos del fondo. Particularmente, se sabe poco del efecto de la variabilidad del pH del agua sobre la supervivencia y la composición específica del bentos calcificante. En tal sentido, los foraminíferos bentónicos calcáreos, que son importantes representantes de la biota de los sedimentos (Jones 2014) y son considerados descriptores del estatus ambiental de los hábitats marinos (Schönfeld et al. 2012), pueden ser especialmente vulnerables a la acidificación del océano (Dias et al. 2010).

Por todo lo explicado, la pregunta que surge y motiva el presente trabajo es: ¿Cuál es el efecto de la hipoxia costera y el bajo pH sobre la composición y diversidad de los foraminíferos bentónicos en un ambiente somero e influenciado por las surgencias costeras como la Bahía de Paracas?

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Hipoxia costera

Los niveles de oxígeno en el medio marino son resultado del balance entre su producción (fotosíntesis), su consumo (respiración aeróbica y otras reacciones químicas) y su intercambio con la atmósfera. En los ambientes costeros, el oxígeno es consumido por medio de la respiración aeróbica de la materia orgánica tanto en la columna de agua como en los sedimentos, y a través de la re-oxidación de los compuestos reducidos (p.ej. especies reducidas de azufre) (Zhang et al. 2010). Altas tasas de respiración aeróbica, estimuladas por una gran producción de materia orgánica, y una limitada ventilación de las aguas generan condiciones de concentraciones bajas de oxígeno. Los autores que reportaron estas condiciones usaron términos como ‘deficiencia de oxígeno’, ‘hipoxia’, ‘zonas muertas’, etc., para describirlas. Esto ocasionó que no exista una terminología universal ni niveles universales específicos que describan condiciones de bajo oxígeno (Rabalais et al. 2002). Actualmente es más frecuente el uso del término ‘hipoxia’ para describir ambientes costeros con bajos niveles de oxígeno. Aunque este es un término originalmente fisiológico que describe las condiciones o respuestas de los organismos producidas por niveles deficientes de oxígeno (Rabalais et al. 2002; Bernhard y Sen Gupta 2003), la hipoxia costera se define como un estado de la columna de agua que tiene niveles de oxígeno disuelto igual o menores a 1.43 mL L^{-1} (2 mg L^{-1} o $63 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ o 30% de saturación) (Rabalais et al. 2010). Este valor se definió inicialmente en base a la conducta evasiva de muchas especies de peces y macro-crustáceos del Golfo de México, pero es relevante como umbral de

oxigenación para los ambientes costeros con organismos que evolucionaron en condiciones bien oxigenadas y que están expuestas a la hipoxia como un estresor reciente (Rabalais et al. 2010; STAP 2011). Otro término asociado a un valor de concentración de oxígeno es el de ‘hipoxia severa’ que Hofmann et al. (2011) describen como una situación de mortalidad masiva de la fauna, en la que solamente sobreviven organismos de especies muy especializadas. Este término está asociado a concentraciones de oxígeno menores o iguales a 0.5 mL L^{-1} . Para ambientes propiamente de fondo, Bernhard & Sen Gupta (1999) usaron el término ‘anoxia’ para definir la ausencia de oxígeno con presencia de H_2S , ‘microxia’ para concentraciones de oxígeno menores o iguales a 0.1 mL L^{-1} y ‘disoxia’ para concentraciones entre 0.1 mL L^{-1} y 1 mL L^{-1} . Más arriba de este valor las condiciones fueron consideradas ‘óxicas’. Tratándose de un ambiente costero y poco profundo, en este estudio se utilizarán los términos hipoxia costera (menor o igual a 1.43 mL L^{-1}) y anoxia (0 mL L^{-1}). En materia de discusión, también se utilizará el término post-oxia, que en términos de concentración de oxígeno tiene la misma definición de la anoxia, sin embargo, se diferencia de esta en que la post-oxia se da en ausencia de sulfuros libres (Bernhard & Sen Gupta 1999).

2.2.2. Escalas de la hipoxia

La duración y extensión de las condiciones hipóxicas varían en órdenes de magnitud. De acuerdo a su duración, la hipoxia puede desarrollarse en cuestión de horas (ciclo diario), semanas (episodios), meses (ciclo estacional) o ser permanente (desde años hasta siglos). De acuerdo a su extensión espacial, la hipoxia puede tener

lugar en dimensiones de estuarios y bahías, de toda la plataforma continental y hasta ser de dimensiones oceánicas; y en profundidades que van desde 1 a 2 metros hasta 600 o 700 metros (Diaz y Rosenberg 2008; Rabalais et al. 2010; STAP 2011).

Rabalais et al. (2010) hicieron una síntesis gráfica de la variabilidad espacial y temporal de los ambientes hipóxicos (Figura 1), donde sugieren que la influencia relativa de factores naturales es más importante en las escalas mayores de tiempo y espacio que la influencia de las actividades humanas que es más importante en las menores escalas. En ese sentido, los factores antropogénicos son responsables de la mayoría de casos de hipoxia de ciclo diario y estacional en estuarios y plataformas continentales internas, y han empeorado las condiciones naturales de bajo oxígeno de algunas bahías y fiordos. La hipoxia de las plataformas externas y zonas batiales es generada y controlada por factores naturales en ciclos interanuales y decenales (Levin et al. 2009), aunque el cambio climático relacionado a actividades humanas puede ser un factor importante en el futuro. Esta diversidad de escalas espaciales y temporales ayuda a comprender la dinámica básica de la hipoxia y sus posibles fuentes (Rabalais et al. 2010).

La eutrofización (ingreso de nutrientes empleados en agricultura a través de ríos y la atmósfera) y la descarga de desechos orgánicos urbanos e industriales en los ambientes marinos son los factores antropogénicos más importantes en la generación de la hipoxia costera. La eutrofización en aumento está generando también el aumento en la ocurrencia, intensidad y duración de la hipoxia en áreas costeras (Diaz & Rosenberg 2008). Sin embargo, factores naturales como la advección de aguas profundas ricas en nutrientes y/o pobres en oxígeno (p.ej. surgencias costeras) establecen la hipoxia natural en algunos ambientes costeros.

La interacción de estos factores con la geomorfología de los ambientes y los procesos como el calentamiento global pueden empeorar las condiciones hipóxicas en intensidad, duración y recurrencia (Levin et al. 2009).

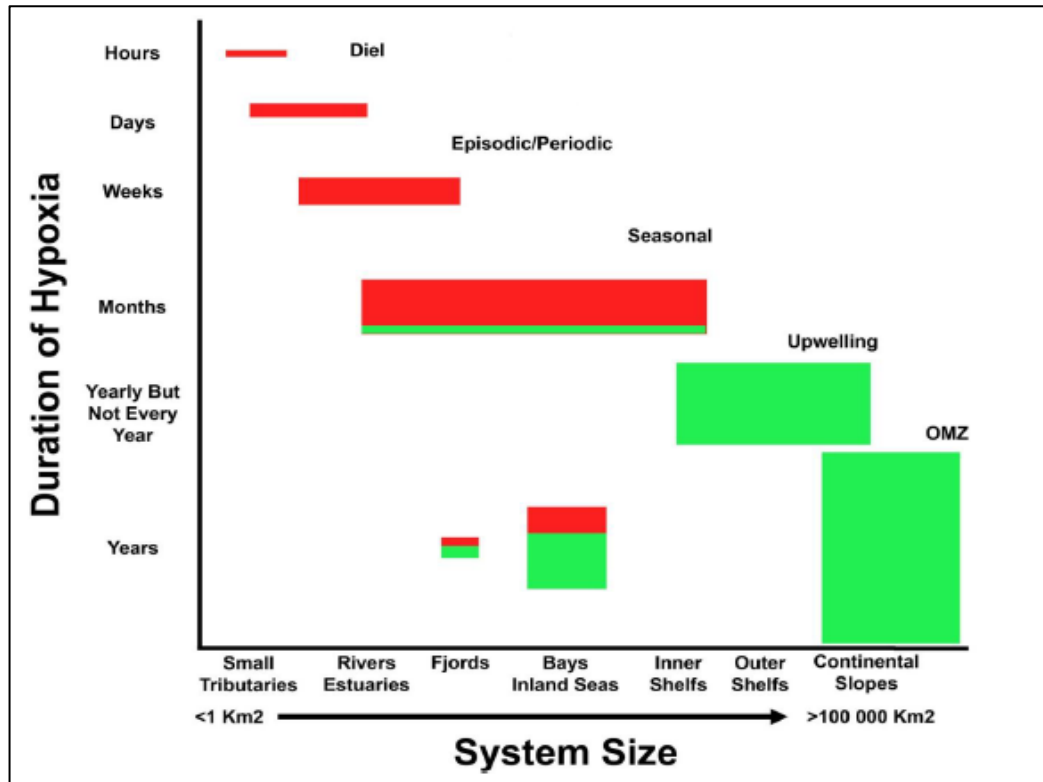
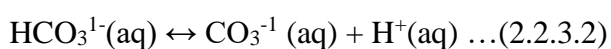
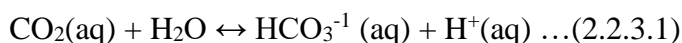


Figura 1. Escalas y tipología de los sistemas hipóxicos (modificado de Rabalais et al. 2009). Los colores rojo y verde representan la influencia de factores antropogénicos y naturales respectivamente.

2.2.3. Dinámica del carbono inorgánico disuelto del océano y condiciones de bajo pH en sistemas costeros

El carbono inorgánico disuelto (DIC, por sus siglas en inglés), está presente en el océano en tres formas principales: dióxido de carbono disuelto $\text{CO}_2(\text{aq})$, ion bicarbonato (HCO_3^{1-}) e ion carbonato (CO_3^{2-}). Además, está presente también en forma de ácido carbónico (H_2CO_3) pero con una concentración menor a 0.3% del

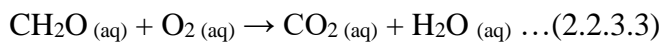
CO₂(aq), mientras que el ion bicarbonato (HCO₃¹⁻) es la forma del DIC más abundante en el océano (>85%) (Gattuso & Hansson 2011). Las especies del DIC se relacionan mediante las siguientes reacciones de equilibrio:



El incremento en la concentración del CO₂ genera el aumento de la concentración del HCO₃¹⁻ para mantener el equilibrio en la ecuación 2.2.3.1, lo cual también conduce a la disminución del pH debido al aumento de protones (H⁺). Con el incremento de los protones, el ion CO₃²⁻ pasa a formar ion HCO₃¹⁻ según la reacción de equilibrio 2.2.3.2 (Libes 2009). El resultado neto del incremento del CO₂ es que no solo disminuye el pH sino también disminuye la concentración del ion carbonato.

En los ambientes costeros como los estuarios, bahías y sistemas de surgencias, la variabilidad natural del CO₂, y la consecuente variación del pH, tienen origen en la combinación de la actividad biológica, el tiempo de residencia del agua, las excursiones mareales y la mezcla (Hofmann et al. 2011b). Particularmente la respiración aeróbica de la materia orgánica es una gran fuente de CO₂ en estos ambientes, ya que como se muestra en la reacción (2.2.3.3), el CO₂ es resultado de ese proceso. Por esta razón, la disminución del oxígeno en el agua de los ambientes

costeros está casi siempre acompañada de la disminución del pH, y aunque el pH del agua no está directamente afectado por el oxígeno, la correlación entre estas dos variables revela el vínculo funcional entre el consumo de oxígeno y la producción de CO₂ (Burnett 1997).



El Sistema de la Corriente de Humboldt frente Perú contiene altos valores de CO₂ en el agua subsuperficial (Paulmier et al. 2011), y debido a la presencia de surgencias costeras permanentes, esta agua es advectada hacia los ambientes menos profundos y más costeros llevando consigo las altas concentraciones de CO₂, de tal forma que el sistema costero frente a Perú constituye una fuente de emisión de CO₂ hacia la atmósfera (Friederich et al. 2008), que conlleva a presentar valores de pH más bajos en la zona más costera de Perú que en la zona oceánica (León et al. 2011).

Adicionalmente, como se mencionó en la sección anterior, la eutrofización está generando el aumento en la ocurrencia, intensidad y duración de la hipoxia costera alrededor del mundo. Sin embargo, debido a que la hipoxia está frecuentemente acompañada del aumento del CO₂ disuelto (Burnett y Stickle 2001), la eutrofización también está generando la disminución de los niveles de pH de los ambientes costeros. Otro factor antropogénico que está modificando los niveles de CO₂ disuelto en el agua de mar es la acidificación del océano, la cual está generando cambios sin precedentes en el ciclo del carbono y sistema de carbonatos (Feely et al. 2004). El 30% del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera desde el inicio de la

era industrial ha sido absorbido por los océanos y la acidez promedio de toda la superficie marina se ha incrementado entre 25% y 30% (equivalente a una disminución de 0.1 unidades de pH) y se pronostica que para finales de siglo la disminución del pH de la superficie del océano global sería en 0.3 unidades adicionales (IPCC 2013). La interacción de estos dos factores y su efecto en la química de carbonatos de las zonas costeras son aún poco conocidos. Ya sean antagonísticos o sinérgicos los efectos de estos dos factores, se piensa que la química de los carbonatos responde más fuertemente a la eutrofización que a la acidificación del océano (Borges & Gypens 2010).

En este trabajo se usará el término “bajo pH” para los niveles de pH menores a 7.8, ya que según Copin-Montégut (1996) el pH de aguas marinas normales varía entre 7.8 y 8.3 con un valor promedio de 8.1. Esta calificación es consistente a los valores de pH reportados como “bajos” para la zona de afloramiento costero frente a Perú central (15° S) (Copin-Montégut & Raimbault 1994), así como la zona de afloramiento costero frente a California, EEUU (Feely et al. 2008).

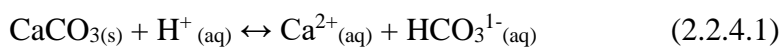
2.2.4. Respiración aeróbica y solubilidad de los carbonatos en sedimentos superficiales

A diferencia de la superficie del océano, que permite la formación espontánea de minerales de carbonato (Morse et al. 2007), los sedimentos costeros superficiales pueden permitir la disolución de una gran proporción de minerales de carbonato, incluso si el agua suprayacente a los sedimentos está sobresaturada de estos minerales (Aller 1982; Green et al. 1998, 2009). Estas condiciones de disolución se

dan si los sedimentos costeros son ricos en materia orgánica (MO), ya que este sustrato genera una intensa respiración bacteriana que genera productos capaces de alterar el estado de saturación del CaCO_3 , promoviendo su disolución (Reaves 1986; Koretsky et al. 2005; Berkeley et al. 2007).

Cuando el oxígeno está disponible, la respiración aeróbica es el proceso dominante en la degradación de la MO en los sedimentos (Koretsky et al. 2005) y produce CO_2 .

Como se mencionó, el CO_2 reacciona con el agua y forma ácido carbónico (H_2CO_3), el cual se disocia liberando iones H^+ y por consiguiente bajando el pH (reacciones 2.2.3.1 y 2.2.3.2). Además, estos iones H^+ promueven la disolución del CaCO_3 mediante el desbalance que genera su ingreso en la siguiente reacción en equilibrio:



Como resultado de la disolución del CaCO_3 se liberan iones bicarbonato (HCO_3^{1-}), componente principal del sistema de carbonatos, y por consiguiente la alcalinidad puede aumentar.

2.2.5. Foraminíferos bentónicos

2.2.5.1. Características generales de los foraminíferos bentónicos

Los foraminíferos bentónicos (phylum Granuloreticulosa, clase Foraminifera) son organismos unicelulares protozoarios que viven principalmente en los sedimentos marinos. Son similares a las amebas en que poseen pseudópodos como proyecciones de su célula, pero se diferencian de estas porque sus pseudópodos poseen gránulos y están conectados entre sí formando una red (Jones 2014). La mayoría de las especies tienen una cubierta externa (conchilla o testa) de material inorgánico compuesta de una o varias cámaras. La taxonomía de los foraminíferos se ha desarrollado sobre la base de la morfología y composición de las testas. Los foraminíferos que no poseen testa inorgánica son comúnmente llamados “tectináceos”, debido a que su testa está compuesta de un mucopolisacárido proteico llamado tectina. Otro grupo importante de especies posee una testa compuesta de granos de sedimento aglutinados en una matriz orgánica o mineral. Los foraminíferos de este grupo son llamados “aglutinados”. El principal y más diverso grupo de especies de foraminíferos son los foraminíferos calcáreos que secretan minerales de calcita en la construcción de su testa. Los foraminíferos calcáreos pueden ser “aporcelanados” o “hialinos”. Los foraminíferos calcáreosaporcelanados poseen una testa de cristales de calcita, dispuestos aleatoriamente, rica en magnesio “Mg”, mientras que los foraminíferos calcáreos hialinos poseen una testa, compuesta de cristales ordenados de calcita, que presenta perforaciones y es pobre en Mg (Jørgen Hansen 2003).

La aparición de la testa calcárea y particularmente la unión lamelar de sus cámaras ha permitido la construcción de testas calcáreas más livianas o más robustas, que condujo a la radiación adaptativa de los foraminíferos calcáreos (Haynes 1981). La forma y arquitectura de las testas es más importante que la cantidad de material calcítico para la dureza de las testas (Murray 2006). La existencia de estructuras como costillas u otras ornamentaciones en la testa contribuye a aumentar el grosor de la testa y su dureza (Wetmore 1987).

Los foraminíferos tectináceos se encuentran en sedimentos tanto de ambientes someros como profundos, pero es en los ambientes profundos donde pueden llegar a ser dominantes en la comunidad (Bernhard et al. 2009). Los foraminíferos aglutinados también se encuentran en todos los ambientes marinos, pero son dominantes en grandes profundidades (>4000 m), mayores a la profundidad de compensación de los carbonatos (CCD, por sus siglas en inglés) que marca el límite en que el carbonato de calcio puede preservarse en los sedimentos. Sin embargo, los foraminíferos aglutinados también dominan en ambientes someros de aguas salobres como los estuarios (Haynes 1981). En cambio, los foraminíferos calcáreos dominan en casi todos los ambientes que estén por encima de la CCD. Los calcáreos aporcelanados son particularmente abundantes en ambientes someros como plataformas internas y bahías, pero disminuyen en abundancia a mayores profundidades (Haynes 1981). Los foraminíferos calcáreos hialinos son abundantes tanto en ambientes someros como profundos, pero son particularmente dominantes en los ambientes de bajos niveles de oxígeno como los sedimentos de algunas cuencas y mares internos con poca renovación de sus aguas, o como los sedimentos

de la plataforma y talud superior de las ZMO de los sistemas de surgencias de borde oriental (Bernhard & Sen Gupta 2003).

2.2.5.2. Comunidades de foraminíferos bentónicos y factores ambientales

De acuerdo a la teoría de nicho ecológico, los patrones de distribución de los foraminíferos bentónicos son controlados por los factores ambientales que han alcanzado valores umbrales (Murray 2001). Es así que muchos estudios experimentales suelen aislar un solo factor para determinar sus valores umbrales. Sin embargo, los resultados indican que los límites críticos para un factor dado son más extremos que lo que sugieren los estudios de campo (Murray 2001). El nicho es entonces un arreglo de circunstancias ambientales particulares a cada especie y cada especie tiene su nicho influenciado por varios factores bióticos y abióticos. Bajo condiciones naturales algunos factores co-varían y se potencian, lo cual puede cambiar los umbrales. Esto explicaría por qué en un ambiente variable existe una fuerte correlación entre cierta especie de foraminífero y un factor en particular, mientras que en otro ambiente no sucede lo mismo (Murray 2006). Los foraminíferos bentónicos también son capaces de resistir (por varios días) los efectos de algunos factores que han excedido los umbrales (p.ej. la anoxia) (Bernhard & Sen Gupta 1999).

Entre los factores abióticos, la salinidad y temperatura ejercen cierto control en los foraminíferos en ambientes marcadamente cambiantes en estos parámetros como se mencionó en la sección anterior. Aquellas especies confinadas a valores normales de salinidad (33-37) y temperatura son llamadas estenohalinas y estenotérmicas

respectivamente, mientras que las especies tolerantes a amplios rangos de estos parámetros son eurihalinas y euritéricas, respectivamente. El oxígeno ha sido considerado como uno de los factores más importantes para la distribución de los foraminíferos en ambientes más profundos. Bajos niveles de oxígeno pueden beneficiar a ciertas especies de foraminíferos ya que eliminan a depredadores y competidores metazoarios. Algunos foraminíferos habitan ambientes hipóxicos, micróxicos e incluso anóxicos soportando la presencia de H₂S por semanas. Sin embargo, aún no se conocen bien los mecanismos fisiológicos que permiten a las especies sobrevivir a condiciones sulfurosas (H₂S). La información disponible sugiere que los foraminíferos son aeróbicos al menos en una parte de su ciclo de vida y con toda seguridad algunos son anaeróbicos facultativos (Bernhard & Gupta 1999).

Por otro lado, si bien es cierto que la diversidad de los foraminíferos a escala global sigue el patrón global de la temperatura, es posible que exista un incremento pronunciado en la diversidad de especies en un gradiente de profundidad. Este patrón puede estar explicado por la hipótesis estabilidad-tiempo que indica que las condiciones ambientales impredecibles en los ambientes más someros permiten solo la presencia de especies tolerantes a amplios rangos de variabilidad, mientras que a mayor profundidad las condiciones ambientales se hacen continuamente más predecibles generando un aumento en la diversidad (Sen Gupta & Kilbourne 1974). Finalmente, los factores bióticos como la competencia, la depredación y la bioperturbación no deben ser obviados aunque sean difíciles de cuantificar.

Entre los factores bióticos, quizás el principal en regular las abundancias de los foraminíferos es el flujo de alimento, pero los mecanismos de esta regulación aún

no se logran entender completamente. Para probar esto son necesarias mediciones del tipo de alimento, cantidad, calidad, variabilidad del suministro y aceptación de una especie dada de foraminífero (Murray 2006). Además, las variaciones en el flujo de alimento suelen estar asociadas a niveles de oxígeno cambiantes. Es por esto que estos dos factores son difíciles de separar en los estudios. Jorissen et al. (1995) explica la relación de estos dos factores en su modelo conceptual 'TROX' aplicado a la distribución vertical en el microhábitat sedimentario. En este modelo se esquematiza los gradientes del oxígeno y del flujo orgánico hacia los sedimentos constituyendo tres escenarios: el oligotrófico con bajo flujo orgánico y gran disponibilidad de oxígeno, que limita a las especies al sedimento superficial debido a la escasez de alimento, el mesotrófico con un flujo de alimento y niveles de oxígeno regulares que permite la existencia de especies infaunales que se profundizan en el sedimento; y el eutrófico que a pesar de presentar el mayor flujo orgánico limita a cualquier especie (epifaunal o infaunal) a vivir en el sedimento superficial debido a la desaparición del oxígeno (anoxia) en los primeros centímetros o milímetros del sedimento (Figura 2).

La acidez en el ambiente bentónico es un factor que ha sido muy poco relacionado al control de la distribución o las abundancias de los foraminíferos bentónicos en la literatura clásica, sino más bien a los procesos tafonómicos en la generación de los ensamblajes fósiles. Con el aumento del interés por evaluar los efectos de la acidificación sobre los ecosistemas marinos, aparecieron recientemente estudios en laboratorio y en campo sobre el posible control de los altos niveles de CO₂, (bajo pH y subsaturación de los carbonatos) sobre las respuestas individuales, poblacionales y comunitarias de los foraminíferos bentónicos (Green et al. 1993,

1998; Le Cadre et al. 2003; Schönfeld et al. 2012; Haynert et al. 2014). Algunos estudios que evaluaron el efecto individual de los cambios del pH del agua sobre comunidades de foraminíferos bentónicos sugieren que ante un gradiente de niveles de pH, la comunidad de foraminíferos bentónicos es menos abundante y menos diversa en las condiciones de menores niveles de pH, debido a la desaparición de especies de testa calcárea en la comunidad (Dias et al. 2010; Uthicke et al. 2013; Pettit et al. 2015)

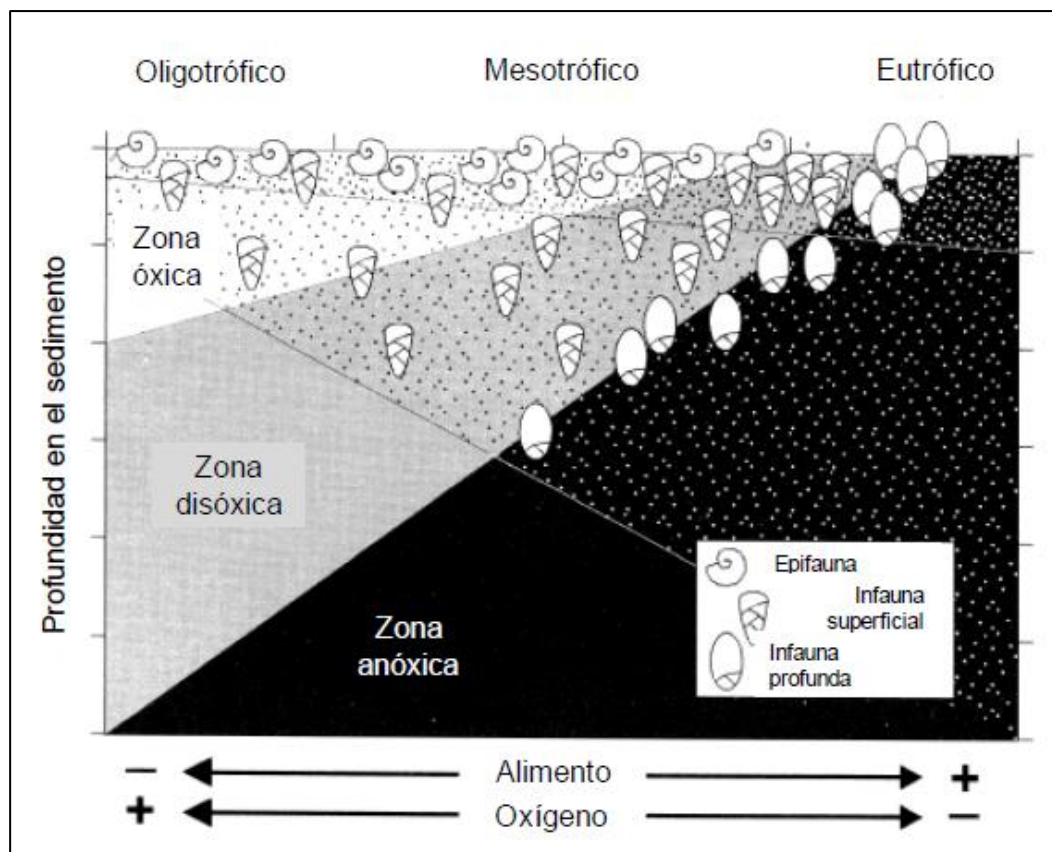


Figura 2. Modelo conceptual TROX (Adaptado de Jorissen et al. (1995)).

2.2.5.3. Foraminíferos bentónicos en ambientes someros

Los ambientes marinos someros son muy diversos en su geomorfología, hidrodinámica y sedimentología. Considerando solo los hábitats de fondos suaves para el estudio de los foraminíferos, estos se extienden desde la zona intermareal hasta la zona interna de la plataforma continental (hasta 30m o 50m de profundidad) (Sen Gupta 2003). Entre estos hábitats se encuentran manglares, marismas, estuarios, fiordos, arrecifes, lagunas y plataformas internas (bahías o playas abiertas de salinidad normal) que usualmente tienen una alta productividad orgánica pero también una alta variabilidad (Sen Gupta 2003). Los patrones zoogeográficos de los foraminíferos en estos ambientes responden a cambios latitudinales en la temperatura (Culver & Buzas 2003). Sin embargo, a nivel local la distribución de la fauna foraminífera puede estar controlada por más de un factor abiótico y también por la acción de factores bióticos (Murray 2006).

En ecosistemas que se caracterizan por la presencia de plantas superiores (mangle y herbáceas respectivamente) en los sedimentos como los manglares y las marismas, los foraminíferos que suelen dominar son de testa aglutinada de los géneros *Ammotium*, *Arenoparrella*, *Jadammina*, *Miliamina* y *Trochammina*, con unos pocos representantes calcáreos (*Ammonia* y *Elphidium*) tolerantes a variaciones en salinidad y temperatura (Sen Gupta 2003). En estuarios y lagunas, los patrones de distribución de foraminíferos están relacionados a un gradiente salino principalmente. Es por esto que los géneros representativos en zonas de bajas salinidades en los estuarios son los mismos géneros aglutinados que se encuentran en manglares y marismas, mientras que en salinidades normales e incluso en

hipersalinidad, las especies calcáreas (hialinas y aporcelanadas) son más importantes (Murray 2006).

En ambientes de salinidad normal en la plataforma interna, ya sean costas abiertas o semicerradas como las bahías, son usuales grandes números de especies con dominio del grupo calcáreo, especialmente los géneros *Elphidium* y *Ammonia* en diferentes latitudes (Sen Gupta 2003). El género *Elphidium* es el clásico ejemplo de un género restringido a ambientes someros. Sin embargo, existen otros géneros como *Discorbis*, *Cibicides*, *Quinqueloculina*, *Rotalia*, *Buliminella*, *Cassidulina* no necesariamente restringidos a los ambientes de plataforma interna, pero muy comunes en ellos. Para la costa oeste de Sudamérica, específicamente la provincia peruano-chilena, Boltovskoy & Wright (1976) mencionan a las especies *Buccella peruviana*, *Cancris inflatus*, *Nonionella auris*, *Bolivina plicata*, *Bolivina costata* y *Discorbis corus* como características de esta provincia aunque algunas de estas especies pueden distribuirse hasta profundidades de talud continental. En Perú, Verano (1974) logró indentificar las especies *Bolivina costata*, *Buliminella* sp., *Buccella peruviana*, *Discorbis peruvianus*, *Cibicides* sp., *Nonion* sp., *Quinqueloculina* spp., para las playas arenosas de Lima. Sin embargo, *B. costata* y *Buliminella elegantissima* han sido reportadas también a profundidades de quiebre de plataforma en Perú (Cardich 2012).

2.3. Justificación de la investigación

Los foraminíferos bentónicos tienen una reconocida utilidad en diversos campos de investigación. En los estudios paleoceanográficos, por ejemplo, se reconstruyen condiciones pasadas de los ambientes sedimentarios a partir de la composición de los ensamblajes fósiles de foraminíferos y de la presencia de *taxa* indicadoras de condiciones ambientales específicas (Gooday 2003). También son usados en estudios de calidad de ecosistemas marinos como descriptores del estatus ambiental en el contexto de la contaminación marina y su manejo (Schönfeld et al. 2012). Además, debido a su abundancia y ubicuidad, también son importantes en estudios de cambio climático y su efecto sobre los organismos marinos en general (Bernhard et al. 2009). Todas estas aplicaciones requieren de un sólido entendimiento de la ecología de los foraminíferos bentónicos y su relación con factores ambientales determinantes, ya que según el concepto de nicho ecológico, las distribuciones locales de los foraminíferos serían explicadas por el efecto individual o combinado de factores que se encuentran en niveles críticos para su supervivencia en determinado tiempo y espacio (Murray 2001).

Además, existe un interés creciente en la comunidad científica sobre los efectos de la expansión de las zonas hipóxicas y de la acidificación del océano sobre los organismos marinos, en especial el bentos y el bentos calcificante en sistemas costeros. Siendo los foraminíferos bentónicos organismos calcificantes muy abundantes, ubicuos y sensibles a los cambios ambientales, también son potencialmente útiles para evaluar los posibles escenarios de cambios en el ecosistema y la diversidad de especies como resultado de los procesos de expansión de la hipoxia costera así como de la acidificación de los ambientes costeros.

Es en este contexto que el presente estudio busca contribuir con el conocimiento del efecto sinérgico y posibles mecanismos de control del pH y el oxígeno sobre estos organismos, usando como caso de estudio un ambiente marino costero altamente productivo como la Bahía de Paracas.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

- Determinar la influencia del régimen de oxígeno y de pH sobre la composición y estructura de la comunidad de foraminíferos bentónicos en la bahía de Paracas

2.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la variación temporal y espacial del oxígeno disuelto y el pH y otras variables en el agua de fondo (salinidad y temperatura) y sedimentos (MOT, clorofila-a, carbonatos, arcilla, limo, etc.).
- Describir la variación espacio temporal de la composición, diversidad y abundancias de los foraminíferos bentónicos (calcáreos y no calcáreos).
- Relacionar las variables de los sedimentos superficiales (fracciones texturales, MOT, carbonatos, clorofila-a, arcilla, etc.) con las variables del agua de fondo (oxígeno, pH, temperatura y salinidad).
- Analizar la relación entre el oxígeno y pH con la composición, diversidad y abundancias de los foraminíferos bentónicos calcáreos y no calcáreos.

2.5. Hipótesis:

H1: El pH en el agua de fondo de la bahía de Paracas varía estacionalmente presentando mínimos valores en los meses de verano asociados al aumento del flujo de materia orgánica y de la respiración.

H2: Ya que niveles muy bajos de pH pueden ocasionar la mortalidad de foraminíferos bentónicos calcáreos por disolución de sus testas, la comunidad de foraminíferos bentónicos presenta menores abundancias y se compone principalmente de especies de testa robusta y/o especies no calcáreas durante el verano y en ambientes sedimentarios más ácidos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio

La Bahía de Paracas es un sistema marino de pequeñas dimensiones ubicado en el extremo sur de la Bahía de Pisco (Provincia Pisco, Región Ica), la cual es una zona altamente productiva en términos biológicos-pesqueros. Tiene una morfología semi-cerrada que la protege de la dinámica física exterior y limita las corrientes y olas al interior (Velazco & Solís 2000; Cabello et al. 2002; Psuty 2005). Aunque sus profundidades no superan la isóbata de 20 m, la bahía está influenciada por las surgencias costeras ya que se ha observado el ingreso recurrente de aguas frías y pobres en oxígeno, típicas de la capa subsuperficial deficiente de oxígeno en la región, al interior de la bahía (Sears 1954; Flores et al. 2004; Ledesma et al. 2011). Su productividad biológica sustenta actividades de extracción y cultivo de recursos hidrobiológicos, los cuales eventualmente son afectados por episodios de hipoxia e incluso anoxia (Guzmán et al. 1997; Sánchez et al. 1997; Cabello et al. 2002; Aguirre-Velarde et al. 2014) ocasionando mortandad en la mayoría de especies, sobre todo las que tienen como hábitats el agua de fondo o los sedimentos mismos.

Tabla 1. Características de las estaciones de muestreo. Prof. = Profundidad. Zonas: Interior de Bahía (B), exterior somero (S) y exterior profundo (P).

Estación	Latitud (S)	Longitud (O)	Prof. (m)	Zona
1	13° 50.92'	76° 16.31'	6	B
2	13° 49.99'	76° 16.77'	8	B
4	13° 48.87'	76° 17.24'	9.5	B
6	13° 47.49'	76° 15.40'	10	S
7	13° 47.29'	76° 17.08'	19	P
10	13° 45.70'	76° 17.38'	20.5	P
11	13° 45.67'	76° 15.38'	12.5	S
16	13° 43.01'	76° 16.33'	10.5	S
26	13° 39.58'	76° 15.49'	10	S

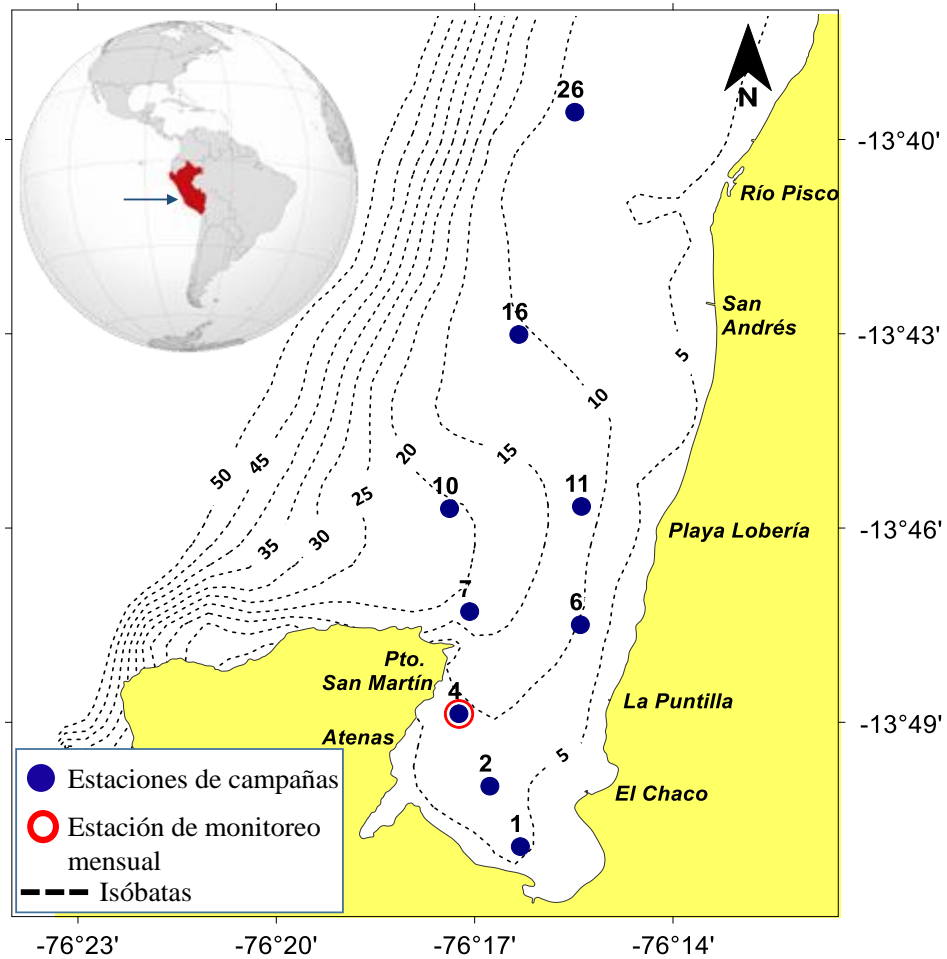


Figura 3. Ubicación de las estaciones de muestreo en la Bahía de Paracas y zona exterior.

3.2. Diseño del estudio

3.2.1. Tipo de estudio

La investigación consiste en un estudio observacional en el que las mediciones de las variables explicativas y las variables respuesta se realizaron tanto en campo como en laboratorio.

3.2.2. Población de estudio

La población de estudio es el conjunto de foraminíferos bentónicos de los sedimentos superficiales finos de la Bahía de Paracas. La muestra es el conjunto de foraminíferos bentónicos de entre 500 y 63 micrómetros de tamaño, de un volumen conocido del primer centímetro superficial del sedimento colectado y replicado.

3.2.3. Operacionalización de las variables

3.2.3.1. Variables explicativas

Son variables ambientales divididas de acuerdo al medio:

En columna de agua:

- Oxígeno.....(% sat, mL L⁻¹)
- Temperatura(°C)
- Salinidad.....(ups)
- pH.....(s/u)
- Demanda bioquímica de oxígeno.....(mg/L)

En sedimentos:

- pH.....(s/u)
- Contenido de Cl-a y feopigmentos.....(μg/g)
- Materia orgánica total.....(%)
- Carbonatos totales.....(%)
- Fracción de arena.....(%)
- Fracción de limo.....(%)
- Fracción de arcilla.....(%)
- Concentración de sulfuros.....(nmol/cm³)
- Carbono orgánico total.....(mg/g)
- Nitrógeno total.....(mg/g)
- Razón C:N.....(s/u)

3.2.3.2. Variables respuesta

Parámetros de la comunidad de foraminíferos bentónicos:

- Abundancia (densidad) de foraminíferos bentónicos (ind./50cm³)
- Abundancia (densidad) de foraminíferos bentónicos calcáreos (ind./50cm³)
- Abundancia relativa de foraminíferos bentónicos no calcáreos (%)
- Proporción de los foraminíferos bentónicos calcáreos robustos al número total de foraminíferos bentónicos calcáreos (%)
- Riqueza de especies de foraminíferos bentónicos (s/u)
- Riqueza de especies de foraminíferos bentónicos calcáreos (s/u)

Parámetros del grupo de foraminíferos bentónicos muertos:

- Abundancia (densidad) de testas vacías de foraminíferos bentónicos calcáreos (n° ind./50cm³)
- Proporción de las testas calcáreas vacías al número total de testas calcáreas (vivos y muertos) de foraminíferos bentónicos (%)

3.2.4. Diseño de muestreo

Para abordar la variabilidad espacio-temporal, se realizaron 2 diseños de muestreo: El primero fue un muestreo espacio-estacional que consistió en la recopilación de datos de oxígeno, temperatura, salinidad y pH de la columna de agua, así como el muestreo de sedimentos para obtener datos de materia orgánica total, clorofila-a, textura, sulfuros y pH intersticial de 9 estaciones de muestreo (1, 2, 4, 6, 7, 10, 11, 16, 26 en Figura 3) en la bahía, las mismas que para el análisis univariado de las variables ambientales y ecológicas fueron agrupadas en categorías espaciales de acuerdo a su ubicación y batimetría en el área de estudio. Así, las estaciones 1, 2 y 4 que se ubican al interior de la bahía fueron agrupadas en la categoría espacial “B” (zona B); las estaciones 6, 11, 16 y 26 que se encuentran fuera de la bahía y tienen una profundidad de aproximadamente 10 metros fueron agrupadas en la categoría espacial “S” (zona S), mientras que las estaciones 4 y 10 que también se ubican fuera de la bahía pero a una profundidad aproximada de 20 metros se agruparon en la categoría espacial “P” (zona P). La colecta de esta información se realizó dentro de las actividades del proyecto Borde Costero de IMARPE, específicamente en 3 campañas del proyecto en Paracas: noviembre (primavera) de 2014, marzo (fines de verano) de 2015 y agosto (invierno) de 2015.

El segundo diseño fue un monitoreo mensual de una estación fija en el interior de la bahía (estación 4, Figura 3), entre los meses de enero y julio de 2015, donde se registraron datos de temperatura, oxígeno y pH de la columna de agua, y se obtuvo muestras de sedimentos para determinar materia orgánica total, carbono orgánico total, sulfuros y pH intersticial. Este muestreo contó además con la recopilación continua de datos de oxígeno y temperatura del agua de fondo, a frecuencia horaria,

mediante el uso de un sensor automático instalado aproximadamente a 20 cm del fondo con la finalidad de registrar la variabilidad de estos parámetros cerca al agua que se encuentra suprayacente al sedimento. Así mismo, se colectaron datos a frecuencia semanal de pH, oxígeno y temperatura en el fondo entre finales de marzo e inicios de junio del 2015. Adicionalmente se tomaron muestras de agua cada semana entre abril y julio para evaluar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), considerado un indicador de la respiración potencial de la materia orgánica. Finalmente, también se accedió a datos históricos de temperatura, oxígeno y pH registrados a frecuencia diaria a 5 metros de la superficie del agua en una estación que tiene aproximadamente 8 metros de profundidad (media agua), desde enero de 2006 hasta setiembre de 2015, frente a Puerto San Martín ($76^{\circ} 17.58'W$, $13^{\circ} 48.50' S$). Las variables fueron registradas por la consultora ambiental Environmental Resource Management (ERM), como parte del programa de seguimiento de las condiciones ambientales (Sistema de Respuesta Temprana) en el área de influencia de la planta de fraccionamiento de LGN y de la plataforma de carga de combustible de la compañía PLUSPETROL.

3.3. Procedimientos y técnicas

3.3.1. Muestreo y medición de variables en columna de agua

En las campañas del proyecto Borde Costero del IMARPE, los parámetros físico-químicos de la columna de agua en todas las estaciones fueron obtenidos mediante el muestreo de agua de superficie y fondo usando una botella Niskin. A partir de estas muestras de agua, se realizó la determinación inmediata de oxígeno disuelto siguiendo el método de titulación de Winkler modificado por Carrit y Carpenter (Strickland & Parsons 1972). Las mediciones de pH se realizaron con un potenciómetro portable Mettler Toledo modelo SG2-SevenGo y la temperatura se midió usando un termómetro de mercurio. Para la salinidad se tomaron muestras de agua en botellas de plástico para luego ser analizadas con un salinómetro marca Portasal Wildine 8410^a que utiliza un método de inducción.

En el monitoreo de la estación frente a Atenas, la medición de los parámetros de la columna de agua (temperatura, oxígeno y pH) se realizaron con un multiparámetro Hanna Instruments modelo HI9828/10, mientras que las mediciones de frecuencia horaria de oxígeno y temperatura de fondo se realizaron por medio de un sensor automático MiniDO2T. Para la determinación de demanda bioquímica de oxígeno se tomaron muestras de agua en botellas de plástico y se mantuvieron cercanas a la congelación hasta su análisis en laboratorio.

3.3.2. Muestreo de sedimentos y agua intersticial

En las campañas, las muestras de sedimento se obtuvieron mediante el uso de un muestreador sacatestigo HAPS Corer (Figura 4) que colecta el sedimento manteniendo el perfil de sedimento con mínima perturbación. El sedimento se obtuvo en tubos de acrílico de 9.6 cm de diámetro interno. Las muestras de foraminíferos bentónicos se colectaron por duplicado, en lances independientes del muestreador. En cada testigo obtenido se seccionó el primer centímetro de sedimento y la muestra fue almacenada en un frasco con 100 ml de formol al 4% tamponado con bórax. Se obtuvieron otros dos testigos que también fueron seccionados para la determinación del contenido de fitopigmentos (Cl-a) en el sedimento. Estas muestras fueron almacenadas en papel aluminio y congeladas hasta su análisis en laboratorio. Además se obtuvo un testigo adicional para extraer el agua intersticial del centímetro superficial del sedimento mediante un capilar con microporos de 0.1 μm de diámetro. Del volumen extraído, 1.5 ml fueron fijados con acetato de zinc al 5% y congelados para la posterior determinación de sulfuros. El resto de agua intersticial se usó para medir el pH mediante el multiparámetro Hanna Instruments modelo HI9828/10. Se obtuvieron muestras adicionales de sedimentos superficiales con una draga Van Veen para las determinaciones de materia orgánica total y textura.

En el monitoreo, los testigos de sedimento se obtuvieron mediante buceo semi-autónomo (compresora) con el uso manual de tubos de acrílico de 6.6 cm de diámetro interno. El sedimento fue seccionado y preservado de igual forma que en las campañas para foraminíferos bentónicos y fitopigmentos. También se realizó la extracción del agua intersticial del mismo modo anteriormente descrito y se obtuvo

muestras adicionales de sedimentos superficiales para las determinaciones de materia orgánica total, carbono orgánico total y nitrógeno total.



Figura 4. Muestreador de sedimentos HAPS Corer usado en el estudio espacio estacional.

3.3.3. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno

El análisis de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua se realizó dentro de las 24 horas posteriores a la obtención de las muestras de superficie y fondo, mediante la metodología de incubación de 5 días a 25°C descrito por APHA et al. (1999).

3.3.4. Determinación de propiedades geoquímicas del sedimento

El análisis granulométrico se realizó mediante el uso de tamices siguiendo la metodología de Ingram (1971) para determinar el contenido porcentual de partículas pertenecientes a las fracciones de gravas y arenas; mientras que para determinar el contenido porcentual de los limos y las arcillas se siguió la metodología de Galehouse (1971), la cual usa la diferencia en el tiempo de precipitación de partículas. La muestra de sedimento se sometió a un pre-tratamiento de eliminación de la materia orgánica usando peróxido de hidrógeno.

El contenido de materia orgánica total (MOT) y el contenido de carbonatos en los sedimentos se determinaron con la metodología de pérdida por ignición de Dean (1974), en el cual la muestra molida de sedimento (de 1g a 2g) es expuesta a temperaturas de 100°C, 550°C y entre 900-1000°C para calcular, por diferencia de pesos, la cantidad de CO₂ liberado por la ignición de la materia orgánica y los carbonatos.

De las muestras de sedimentos almacenadas en papel aluminio se determinaron el contenido de fitopigmentos como clorofila-a (Cl-a) y feopigmentos (producto de la degradación de la molécula de Cl-a) mediante el método fluorométrico con doble extracción de acetona al 90% (Gutiérrez et al. 2000).

Los contenidos de carbono total y nitrógeno total en el sedimento superficial fueron determinados con un analizador elemental Perkin Elmer 2400 serie II en el laboratorio de Geología Marina de IMARPE, mediante un método de oxidación instantánea de la muestra. El carbono orgánico total (COT) se obtuvo de manera indirecta al restar el contenido de carbono total en la muestra menos el carbono

inorgánico representado por los carbonatos totales. La razón C:N es la razón molar entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.

3.3.5. Determinación de concentración de sulfuros en agua el intersticial.

De las muestras de agua intersticial fijadas con acetato de zinc al 5% se determinó la concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en laboratorio mediante el método colorimétrico desarrollado por Cline (1969) que se basa en la formación de un complejo de azul de metileno para la medición de su absorbancia mediante espectrofotometría a 670nm de longitud de onda.

3.3.6. Análisis de muestras biológicas

3.3.6.1. Tratamiento de las muestras

Las muestras de foraminíferos fueron teñidas con rosa de bengala (1g por litro de solución de formol 4% tamponado con bórax) para distinguir los individuos vivos y muertos (testas vacías) al momento de la colecta. Posteriormente, para el análisis biológico se calculó primero el volumen de la muestra restando la solución de fijación y de tinción, luego esta fue lavada y separada usando tamices de 63um, 150um y 500um de abertura de malla para tener dos intervalos de tamaño. Las muestras muy ricas en abundancia de foraminíferos fueron cuarteadas en un micro-cuarteador 'Folsom' a un volumen que contuvo al menos 300 individuos. Finalmente las fracciones se observaron al estereoscopio para reconocer las especies, taxa funcionales (tipo de testa) y determinar las abundancias por

especie/grupo funcional. Se siguió el criterio de Tapia et al. (2008) para diferenciar los especímenes vivos de los muertos en los foraminíferos con testa calcárea o aglutinada reconociendo como vivo solamente a los que presentaban todas las cámaras teñidas menos la última más grande. Mientras que para los foraminíferos desnudos se clasificó como vivos aquellos que aún presentaban su segunda membrana translúcida. Todos ellos fueron extraídos mediante una pipeta Pasteur y almacenados en microviales con solución de formol al 4% sobresaturado con bórax. La abundancia se expresó como densidad (número de individuos o testas entre 50cm³ de sedimento superficial).

3.3.6.2. Análisis de los foraminíferos de testas calcáreas

Existe una resistencia relativa a la disolución de las testas calcáreas debido a diferencias específicas en la microestructura y arquitectura que confieren mayor robustez a las testas de algunas especies (Kotler et al. 1992). Considerando esto, y con la finalidad de encontrar efectos del pH del agua sobre las especies calcáreas en la comunidad de foraminíferos bentónicos, se caracterizó su fragilidad en la manipulación de observación al microscopio estereoscópico, así como por descripciones de las especies en la literatura consultada. A partir de ello, se agrupó las abundancias relativas de foraminíferos calcáreos tanto por grupo taxonómico como por categoría de ‘robustos’ y ‘frágiles’.

Además de registrar las abundancias de los foraminíferos calcáreos que estuvieron vivos al momento de la colecta, también se registró la abundancia de testas vacías correspondientes a individuos calcáreos muertos sin distinción por especie.

Adicionalmente, se calculó la proporción del número de testas vacías (muertos) del total de testas calcáreas (vivos y muertos). Se asume que debido al corto ciclo de vida de los foraminíferos (pocas semanas a meses; Hayward et al. 2014), este cociente no es afectado significativamente por variaciones súbitas en el tamaño de las poblacionales. Este índice comprende valores entre 0 y 1, donde valores más cercanos a 1 indican buenas condiciones de preservación de las testas vacías, mientras que valores más cercanos a 0 indican condiciones de disolución de las mismas. Este análisis se realizó en las dos fracciones de tamaño.

3.4. Plan de análisis

Los cambios espacio-temporales de cada variable fueron evaluados mediante el análisis de varianza (ANOVA) de dos factores para un nivel de significancia (α) de 0.05 y 0.1, confirmando previamente la homogeneidad de varianzas mediante el test de Fligner-Killeen que es menos sensible a la falta de normalidad de los datos (Conover et al. 1981). El factor tiempo tuvo como grupos los datos obtenidos en cada campaña de muestreo (noviembre, marzo y julio), mientras que el factor espacio tuvo como grupos los datos correspondientes a cada zona (B, S, P) establecida en la sección 3.2.4. Posteriormente se realizó el test *post hoc* Tukey HSD para identificar los grupos significativamente diferentes y la distinción de los grupos homogéneos se realizó con un nivel de significancia de 0.1. Se realizaron transformaciones de $\log(x+1)$ y raíz cuarta a los datos, y aquellos que no pasaron la prueba de homocedasticidad fueron analizados mediante el test no paramétrico Kruskal Wallis.

Se realizaron análisis de clasificación por conglomerados (*cluster*) con las abundancias relativas promediadas en el tiempo de los foraminíferos bentónicos calcáreos más importantes (frecuencia > 10% de las muestras), con el fin de determinar agrupamientos de las estaciones de muestreo y agrupamientos de las especies de foraminíferos calcáreos. Los análisis *cluster* en modo-Q y modo-R estuvieron basados en una matriz de similaridad de Bray-Curtis y usando el criterio jerárquico de Ward. Además se realizó también un análisis *cluster* en modo R en base a una matriz de similaridad de Jaccard de datos de presencia/ausencia de las especies calcáreas.

Todo el procesamiento y análisis de la data se realizará con el software R versión 3.2.0. Los mapas fueron generados con el programa computacional SURFER (Golden software Inc., versión 12.4.784).

3.4.1. Contrastación de la hipótesis 1

La hipótesis de la variación estacional del pH de agua de fondo se puso a prueba mediante un test ANOVA y un posterior test post hoc de Tukey de los datos del diseño espacio-estacional. A su vez, el cambio temporal en la sedimentación orgánica y la respiración fueron inferidos del contenido de carbono orgánico total, nitrógeno total y razón C:N en los sedimentos en el diseño de monitoreo de punto fijo.

3.4.2. Contrastación de la hipótesis 2

Para evaluar los cambios de la comunidad de foraminíferos bentónicos en relación a los cambios del pH del agua de fondo, se realizó inicialmente el análisis de varianza ANOVA de la abundancia y diversidad de la comunidad de foraminíferos bentónicos, así como de la abundancia relativa del grupo de foraminíferos no calcáreos y la proporción de foraminíferos calcáreos robustos, para confirmar el patrón espacial y temporal propuesto en la hipótesis. Posteriormente, para evidenciar la relación entre el pH y las variables comunitarias, se realizó un análisis de correlación no paramétrica de rangos de Spearman (r_s) entre las variables abióticas del agua de fondo y el sedimento superficial *versus* todas las variables de la comunidad de foraminíferos bentónicos para un nivel de significancia (α) de 0.05 y 0.1 y utilizando la corrección de Bonferroni (Glantz 2002).

4. RESULTADOS

4.1. Estudio de la variabilidad espacio estacional

4.1.1. Variables fisicoquímicas de columna de agua

Los registros de las variables fisicoquímicas que caracterizan la superficie y el fondo de la columna de agua en las estaciones de muestreo se muestran en la Tabla 2 para cada campaña de este estudio. El proyecto ‘Borde Costero’ del IMARPE registró estas mismas variables en estaciones adicionales de muestreo exclusivo de columna de agua, cuyos resultados se presentan en los anexos A1, A2 y A3. Con estos datos adicionales se elaboraron figuras de distribución espacial de temperatura, salinidad, oxígeno y pH de fondo (Figuras 5, 6, 7 y 8) de las tres campañas de estudio. Los detalles de los resultados estadísticos de esta sección basados en los datos de las estaciones de muestreo se presentan en anexos.

La temperatura en la zona de estudio en la campaña de noviembre de 2014 varió entre un mínimo de 16.80 °C y un máximo de 22.0 °C en superficie, y entre un mínimo de 14.8 °C y un máximo de 20.7 °C en fondo. Para la campaña de marzo de 2015, la temperatura varió entre un mínimo de 16.4 °C y un máximo de 25.6 °C en superficie, y entre un mínimo de 15.4 °C y un máximo de 20.1 °C en fondo. Para la campaña de julio de 2015, la temperatura varió entre un mínimo de 17.9°C y un máximo de 20.4°C en superficie, y entre 17.8 °C y 18.9 °C en fondo. La temperatura de fondo no presentó diferencias espaciales significativas, pero sí temporales ($F_{(2,24)} = 31.96, p < 0.001$), y fue julio de 2015 el mes que presentó las temperaturas mayores a los otros dos meses ($p < 0.1$) (Anexo A4). En comparación a las

campañas anteriores, en julio la temperatura fue bastante homogénea horizontalmente, mientras que en noviembre de 2014 se observó un gradiente espacial con menores valores en el interior de la bahía y los mayores al norte de la misma (Figura 5).

Respecto a la salinidad, en la campaña de noviembre de 2014 varió entre 34.49 y 35.38 ups en superficie y entre 34.79 y 35.13 ups en fondo. En la campaña de marzo de 2015, la salinidad varió entre 27.76 y 35.13 ups en superficie y entre 34.79 y 35.17 ups en fondo. En julio varió entre 35.02 y 35.23 ups en superficie y entre 35.13 y 35.23 ups en fondo. La salinidad de fondo no presentó diferencias espaciales significativas pero sí temporales ($F_{(2,24)} = 22.96, p < 0.001$), donde julio y marzo presentaron salinidades de fondo significativamente mayores a noviembre de 2014 ($p < 0.1$) (anexo A4). Sin embargo, la salinidad de superficie tuvo mínimos valores en marzo al norte de la bahía, a la altura del río Pisco, el cual suele tener sus máximos caudales en verano. Además, al igual que la temperatura, la salinidad en julio fue más homogénea horizontalmente (Figura 6).

El oxígeno disuelto en la zona de estudio, en noviembre de 2014, varió entre 2.86 y 8.29 mL L⁻¹ en superficie y entre 0.24 y 6.42 mL L⁻¹ en fondo. En marzo de 2015, el oxígeno disuelto varió entre 0.0 y 4.47 mL L⁻¹ en superficie y entre 0.0 y 1.4 mL L⁻¹ en fondo. Mientras que en julio de 2015, varió entre 1.73 y 5.69 mL L⁻¹ en superficie y entre 0.88 y 5.08 mL L⁻¹ en fondo. El oxígeno disuelto del fondo no presentó diferencias espaciales significativas pero sí temporales ($F_{(2,24)} = 62.89, p < 0.001$), ya que julio de 2015 presentó niveles de oxígeno disuelto significativamente mayores a los de noviembre de 2014 y este a su vez mayores a los de marzo de 2015 ($p < 0.1$) (anexo A4). La distribución espacial del oxígeno

disuelto de fondo fue muy homogénea en marzo presentando anoxia sobre todo en el lado este de la zona de estudio (Figura 7).

El pH del agua en noviembre de 2014 varió entre 7.73 y 8.48 en superficie y entre 7.65 y 8.27 en fondo. En marzo de 2015, el pH varió entre 7.33 y 8.16 en superficie y entre 7.46 y 7.76 en fondo. Mientras que en julio, varió entre 7.59 y 8.00 en superficie y entre 7.70 y 8.00 en fondo. El pH del agua de fondo no presentó diferencias espaciales significativas pero sí temporales ($F_{(2,24)} = 11.75$, $p = 0.001$), ya que julio de 2015 y noviembre de 2014 presentaron niveles de pH mayores a los niveles de marzo de 2015 ($p < 0.1$) (Anexo A4). Así como el oxígeno disuelto, el pH del agua de fondo tuvo una distribución espacial muy homogénea en marzo de 2015 con los menores valores en el lado este de la zona de estudio (Figura 8).

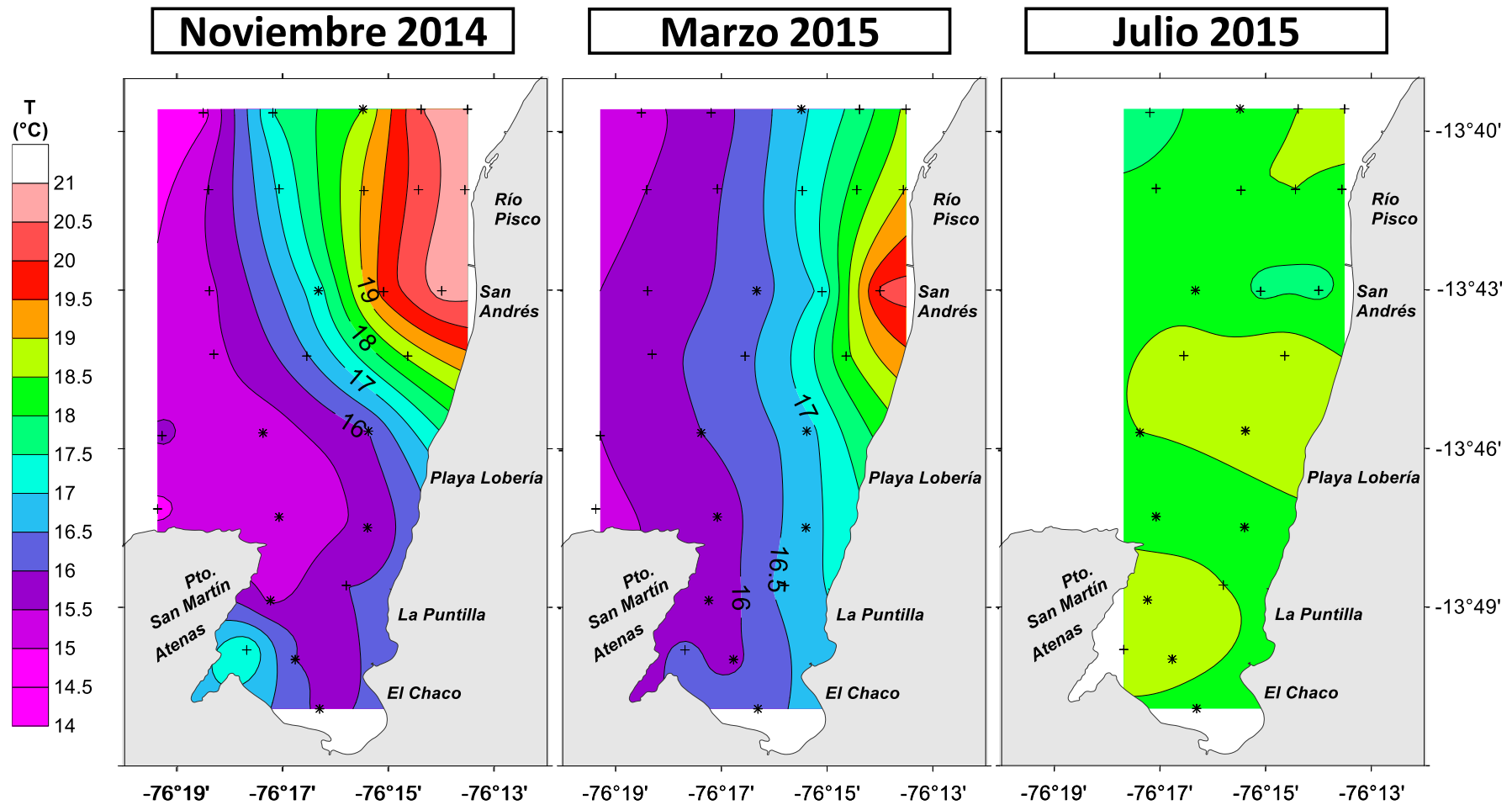


Figura 5. Distribución espacial de la temperatura de fondo en el área de estudio en las tres campañas de muestreo. (*) Estaciones de sedimentos y columna de agua (+) Estaciones de columna de agua.

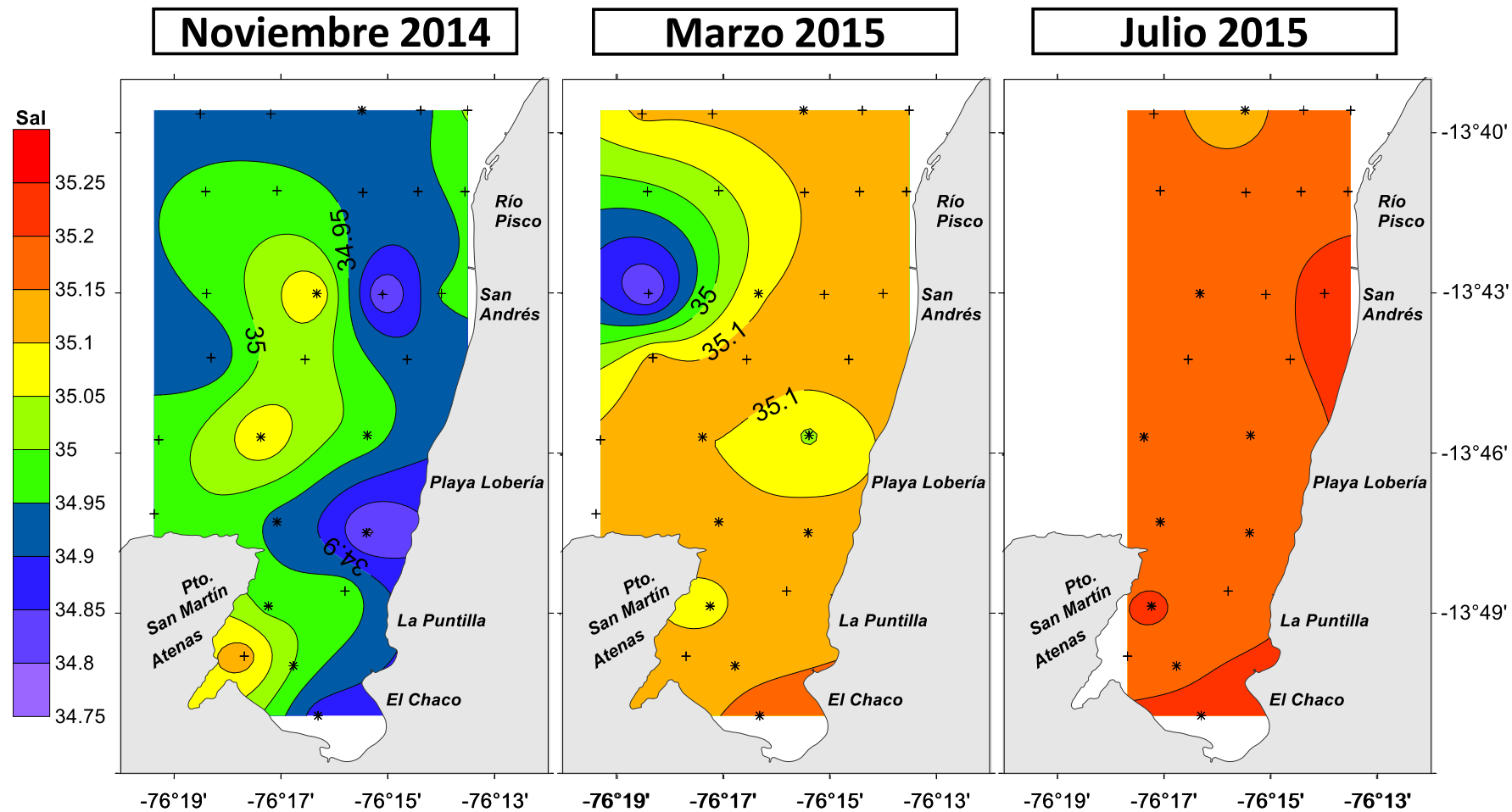


Figura 6. Distribución espacial de la salinidad de fondo en el área de estudio en las tres campañas de muestreo. (*) Estaciones de sedimentos y columna de agua (+) Estaciones de columna de agua.

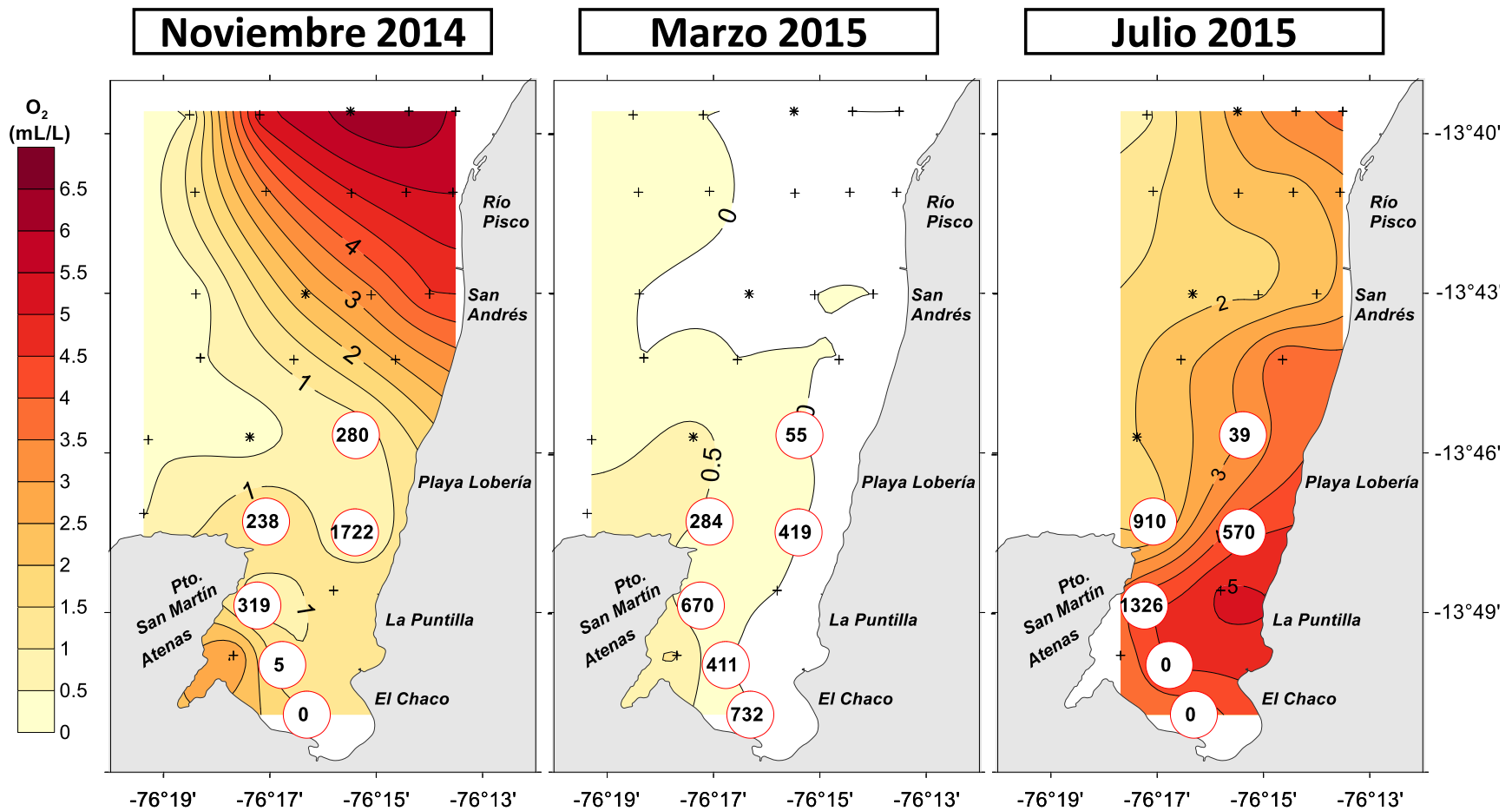


Figura 7. Distribución espacial del oxígeno de fondo en el área de estudio en las tres campañas de muestreo. En círculos: valores superpuestos de H_2S del primer centímetro de sedimento en algunas estaciones de sedimentos. (*) Estaciones de sedimentos y columna de agua. (+) Estaciones de columna de agua.

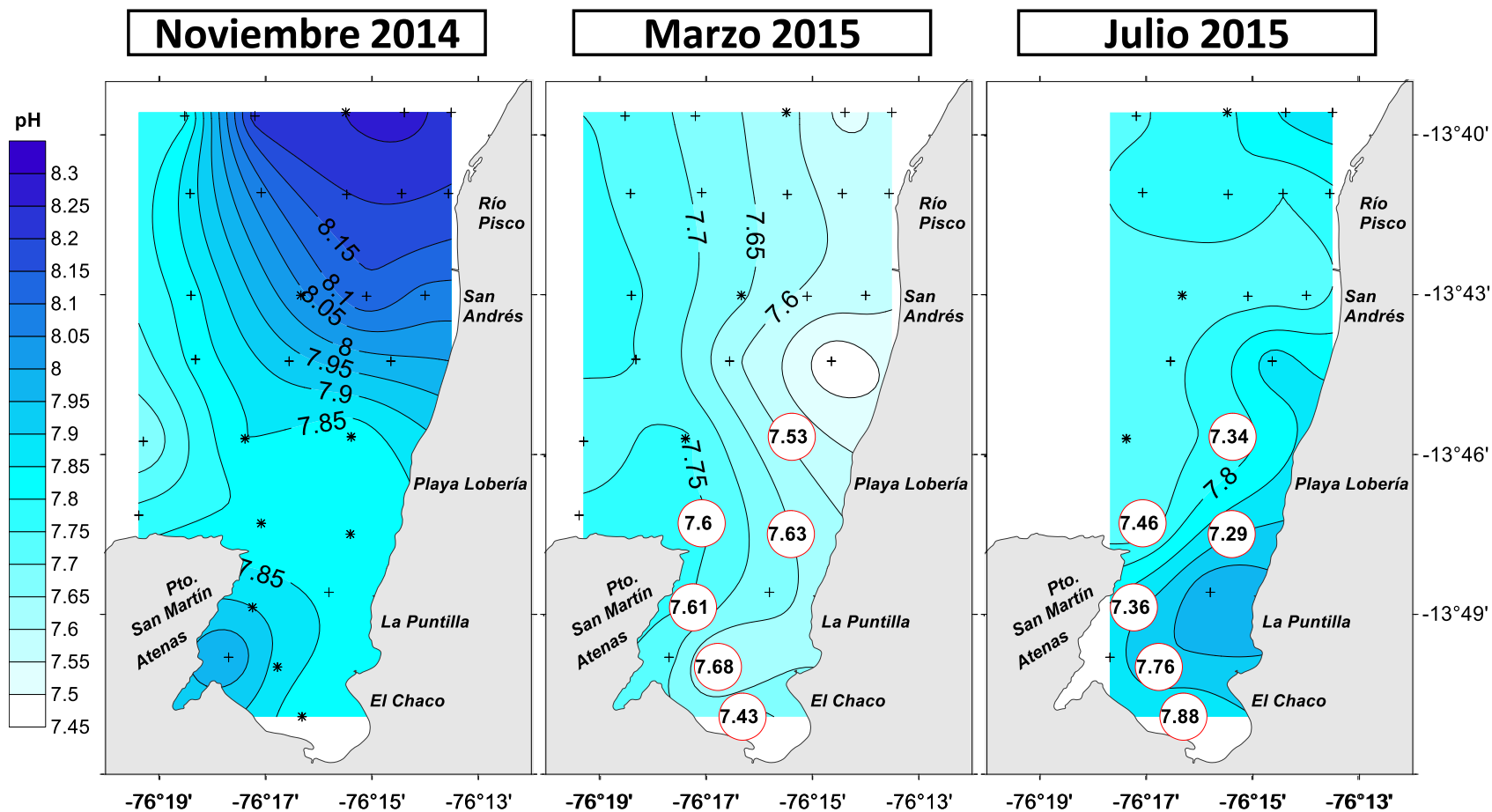


Figura 8. Distribución espacial del pH de fondo en el área de estudio en las tres campañas de muestreo. En círculos: valores superpuestos de pH intersticial del primer centímetro de sedimento en algunas estaciones de sedimentos. (*) Estaciones de sedimentos y columna de agua. (+) Estaciones de columna de agua.

Tabla 2. Variables fisicoquímicas de la columna de agua en las estaciones de muestreo en las campañas de noviembre (N) de 2014, marzo (M) y julio (J) de 2015. s/u: sin unidad.

Nivel	Zona	Estación	Salinidad (ups)			Temperatura (°C)			Oxígeno (mL/L)			pH (s/u)		
			N	M	J	N	M	J	N	M	J	N	M	J
Superficie	B	1	35.02	35.11	35.23	18.70	17.90	18.40	4.00	1.56	4.55	7.73	7.54	7.59
		2	34.95	35.10	35.18	19.30	18.50	19.10	5.11	1.74	5.11	8.17	7.55	8.00
		4	34.95	35.12	35.21	18.80	17.00	20.40	5.00	2.81	5.69	8.20	7.68	7.97
	P	7	34.96	34.94	35.14	17.90	17.80	18.40	5.23	1.93	1.73	8.11	7.68	7.68
		10	34.96	35.13	35.10	18.70	17.20	18.70	5.21	1.75	2.60	8.23	7.61	7.75
	S	6	34.80	35.09	35.19	17.90	19.00	18.50	5.71	1.21	4.36	7.92	7.57	7.89
		11	34.97	35.13	35.18	20.40	18.60	18.90	2.86	0.93	3.05	8.37	7.54	7.75
		16	34.91	33.74	35.15	20.20	19.20	18.90	6.39	1.84	2.40	8.27	7.67	7.79
		26	34.92	31.39	35.19	21.10	23.00	18.50	7.07	3.07	3.01	8.37	8.03	7.90
	Fondo	B	1	34.87	35.17	35.23	15.90	16.30	18.30	1.52	0.00	3.63	7.81	7.73
2			35.00	35.13	35.18	16.00	15.90	18.70	1.05	0.00	4.59	7.88	7.55	7.94
4			34.98	35.09	35.21	15.40	15.60	18.80	0.62	0.18	4.41	7.90	7.75	7.89
P		7	34.93	35.12	35.16	15.20	15.70	18.30	1.67	0.47	1.63	7.80	7.76	7.70
		10	35.10	35.10	35.16	15.20	16.00	18.50	0.24	0.64	2.00	7.85	7.76	7.73
S		6	34.79	35.13	35.19	15.60	16.80	18.40	0.71	0.00	4.36	7.82	7.65	7.90
		11	34.98	35.04	35.18	16.00	16.80	18.60	0.62	0.00	3.00	7.81	7.59	7.76
		16	35.10	35.09	35.18	17.30	16.30	18.40	2.40	0.00	1.79	8.04	7.66	7.72
		26	34.92	35.13	35.13	18.50	16.90	18.30	6.23	0.00	2.77	8.25	7.62	7.79

4.1.2. Variables sedimentarias

4.1.2.1. Textura del sedimento

Los porcentajes de arena, limo y arcilla en las tres campañas de muestreo se presentan en la Tabla 3. Los detalles de los resultados estadísticos de esta sección se presentan en anexos.

El contenido porcentual de la arena en noviembre de 2014 presentó un rango entre 0.3% y 26.8%, en marzo de 2015 el rango fue entre 0.7% y 14.0%, y en julio de 2015 fue entre 0.6% y 23.8%. El porcentaje de arenas no presentó diferencias temporales ni espaciales significativas (anexo 5). El contenido porcentual de limos en noviembre de 2014 estuvo en un rango entre 23.1% y 90.2%, en marzo varió entre 20.9% y 78.9%, y en julio varió entre 19.1% y 75.5%. El porcentaje de limos no presentó diferencias temporales significativas, pero sí espaciales ($F_{(2,24)} = 4.08$, $p = 0.035$), ya que la zona 'P' presentó mayor contenido de limos que la zona 'S' y este a su vez mayor que la zona 'B' ($p < 0.1$) (anexo A5). El contenido porcentual de arcillas en noviembre de 2014 varió entre 9.4% y 67.2%, en marzo de 2015 fue entre 13.8% y 66.6%, y en julio de 2015 fue entre 20.5% y 80.31%. El porcentaje de arcillas no presentó diferencias temporales significativas pero sí espaciales ($F_{(2,24)} = 5.97$, $p = 0.010$), ya que la zona 'B' presentó mayor contenido de arcillas que las otras dos zonas ($p < 0.1$) (anexo A5).

Tabla 3. Contenido porcentual de arenas, limos y arcillas en los sedimentos de las estaciones de muestreo en las campañas de noviembre (N) de 2014, marzo (M) y julio (J) de 2015.

Zona	Estación	Arenas (%)			Limos (%)			Arcillas (%)		
		N	M	J	N	M	J	N	M	J
B	1	11.0	10.9	8.8	23.1	45.0	25.6	66.0	44.2	65.6
	2	6.9	6.9	0.6	52.4	44.6	19.1	40.8	48.5	80.3
	4	5.3	5.0	5.0	27.4	33.1	74.5	67.2	61.9	20.5
P	7	7.2	5.3	12.2	61.4	75.1	53.5	31.3	19.4	34.3
	10	1.1	14.0	1.4	69.3	72.2	75.5	29.6	13.8	23.1
S	6	26.8	12.4	23.8	29.6	20.9	30.6	43.7	66.6	45.7
	11	0.3	4.6	1.1	90.2	76.3	60.7	9.4	19.1	38.3
	16	0.5	0.7	0.7	71.3	45.1	46.1	27.6	54.0	53.3
	26	3.0	4.0	0.9	72.4	78.9	61.7	24.7	17.1	37.4

4.1.2.2. Propiedades geoquímicas del sedimento

El contenido porcentual de materia orgánica total (MOT) y carbonatos totales en los sedimentos de todas las estaciones y campañas de muestreo se puede apreciar en la Tabla 4, mientras que los resultados de clorofila-a en sedimentos y la razón clorofila-a: feopigmentos en el primer centímetro del sedimento se muestran en la Tabla 5. Los detalles de los resultados estadísticos de esta sección se presentan en anexos.

La MOT varió entre 4.11% y 11.77% en noviembre de 2014, entre 4.87% y 17.8% en marzo de 2015, y entre 4.48% y 13.34% en julio de 2015. Los mayores valores se encontraron al interior de la bahía y los mínimos siempre fueron de la estación 26. El análisis ANOVA indica que la MOT presentó diferencias significativas temporales ($F_{(2,24)} = 8.23, p = 0.003$) y espaciales ($F_{(2,24)} = 14.09, p < 0.001$),

siendo marzo el mes en que hubo mayor MOT que los otros dos meses ($p < 0.1$), y la zona ‘B’ presentó mayor MOT que las zonas ‘P’ y ‘S’ ($p < 0.1$) (anexo A6).

El contenido porcentual de carbonatos totales varió entre 7.3% y 13.75% en noviembre de 2014, entre 4.75% y 12.76% en marzo de 2015, y entre 5.69% y 14.27% en julio de 2015. No hubo diferencias temporales significativas pero sí espaciales ($F_{(2,24)} = 5.67$, $p = 0.012$) ya que la zona ‘S’ presentó menor contenido de carbonatos totales que las zonas ‘P’ y ‘B’ ($p < 0.1$) (anexo A6).

Los promedios del contenido de pigmentos de clorofila-a (Cl-a) en el sedimento superficial variaron entre 2.2 $\mu\text{g/g}$ y 95.9 $\mu\text{g/g}$ en noviembre de 2014, entre 3.2 $\mu\text{g/g}$ y 44.3 $\mu\text{g/g}$ en marzo de 2015, y entre 2.3 $\mu\text{g/g}$ y 17.4 $\mu\text{g/g}$ en julio de 2015. No hubo diferencias temporales significativas, pero sí espaciales ($F_{(2,24)} = 5.88$, $p = 0.012$), debido a que la zona “B” presentó mayores contenidos de clorofila-a que las otras dos zonas ($p < 0.1$). La razón Cl-a:feopigmentos no presentó diferencias espaciales ni temporales significativas (anexo A6).

Tabla 4. Contenido porcentual de materia orgánica (MOT) y carbonatos (CaCO_3) de las estaciones de muestreo en las campañas de noviembre (N) de 2014, marzo (M) y julio (J) de 2015.

Estación	MOT (%)			CaCO_3 (%)		
	N	M	J	N	M	J
1	10.78	16.67	10.21	10.7	10.06	9.52
2	11.77	15.63	13.34	11.08	11.4	14.27
4	11.21	17.80	9.07	13.75	10.27	9.21
7	9.12	9.92	7.36	12.09	10.59	10.08
10	8.17	9.94	9.97	11.06	12.76	9.47
6	9.78	13.67	7.31	8.21	8.24	9.85
11	8.46	10.97	8.18	10.81	4.75	11.75
16	7.26	10.77	6.33	12.13	8.57	8.51
26	4.11	4.87	4.48	7.3	6.47	5.69

Tabla 5. Contenido de clorofila a (Cla-a) y razón clorofila-a : feopigmentos (Cla-a/Feop) de las estaciones de muestreo en las campañas de noviembre (N) de 2014, marzo (M) y julio (J) de 2015, expresados como promedio (n=2) \pm desviación estándar. *=valores sin réplica. s/u= sin unidad.

Estación	Clorofila-a ($\mu\text{g/g}$)			Razón Cla-a : Feop (s/u)		
	N	M	J	N	M	J
1	32.30 \pm 6.40	19.10 \pm 0.40	17.40 \pm 0.30	0.34 \pm 0.02	0.32 \pm 0.00	0.32 \pm 0.00
2	13.60 \pm 4.80	25.50 \pm 7.70	9.90 \pm 1.20	0.27 \pm 0.03	0.32 \pm 0.03	0.24 \pm 0.00
4	95.90 \pm 35.40	29.10 \pm 19.70	8.20 \pm 0.90	0.63 \pm 0.22	0.39 \pm 0.15	0.25 \pm 0.02
7	7.70 \pm 1.00	15.50 \pm 1.00	6.30 \pm 0.02	0.21 \pm 0.03	0.21 \pm 0.03	0.17 \pm 0.01
10	6.30 \pm 0.90	8.50 \pm 0.20	-	0.19 \pm 0.00	0.22 \pm 0.00	-
6	3.50 \pm 0.10	3.20 \pm 0.00	3.20 \pm 1.30	0.19 \pm 0.00	0.19 \pm 0.00	0.21 \pm 0.04
11	4.40 \pm 0.30	44.30 \pm 2.10	2.30 \pm 0.10	0.23 \pm 0.01	0.55 \pm 0.09	0.18 \pm 0.00
16	11.30*	8.90 \pm 5.80	2.50 \pm 0.80	0.30*	0.37 \pm 0.11	0.42 \pm 0.05
26	2.20*	3.50 \pm 0.60	9.40 \pm 4.90	0.20*	0.37 \pm 0.00	0.37 \pm 0.00

4.1.3. Variables del agua intersticial

4.1.3.1. Sulfuros

Como se mencionó en la metodología, la concentración de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el agua intersticial de los sedimentos se obtuvo únicamente para 6 estaciones (1, 2, 4, 6, 7 y 11). En la Tabla 6 se presentan las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el centímetro superficial y el inventario de sulfuro de hidrógeno para los 5 primeros centímetros del sedimento. En noviembre de 2014 los sulfuros del centímetro superficial del sedimento variaron entre 0.0 nmol/cm^3 (estación 1) y 1395.1 nmol/cm^3 (estación 6); en marzo de 2015 el rango fue entre 43.1 nmol/cm^3 (estación 11) y 629 nmol/cm^3 (estación 1), y en julio de 2015 el rango fue entre 0.0 nmol/cm^3 (estación 1 y estación 2) y 1153.7 nmol/cm^3 (estación 4). En la Figura 7 se muestran las concentraciones del H_2S del centímetro superficial

de sedimento superpuestos a la distribución espacial del oxígeno de fondo, mientras que en la Figura 9 se presentan junto a los niveles del pH del agua de fondo.

4.1.3.2. pH

Los niveles de pH del agua intersticial del primer centímetro de sedimento en las mismas estaciones en que se obtuvieron las concentraciones de sulfuros se pueden observar en la Tabla 6. En marzo de 2015 el pH intersticial del centímetro superficial del sedimento se encontró en un rango entre 7.43 (estación 1) y 7.68 (estación 2) con valores intermedios en las estaciones afuera de la bahía y en la estación E4, mientras que en julio de 2015 varió entre 7.29 (estación 6) y 7.88 (estación 1) con los mínimos valores en las estaciones afuera de la bahía y en la estación E4. En la Figura 8 se muestran estos valores de pH del centímetro superficial de sedimento superpuestos a la distribución espacial del pH de fondo, mientras que en la Figura 9 en comparación con el pH de fondo y los sulfuros.

Tabla 6. Concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el primer centímetro del sedimento, inventario de concentraciones de sulfuro de hidrógeno de los 5 primeros centímetros y pH del primer centímetro de sedimento de 6 estaciones de muestreo en las campañas de noviembre (N) de 2014, marzo (M) y julio (J) de 2015. s/u= sin unidad.

Zona	Estación	H ₂ S [0-1 cm] (nmol/cm ³)			pH [0-1 cm] (s/u)		
		N	M	J	N	M	J
B	1	0	629.9	0	-	7.43	7.88
	2	4.3	361.4	0	-	7.68	7.76
	4	283.5	589.2	1153.7	-	7.61	7.36
P	7	202.3	247.3	773.1	-	7.6	7.46
S	6	1395.1	330.9	438.7	-	7.63	7.29
	11	212.9	43.1	25.5	-	7.53	7.34

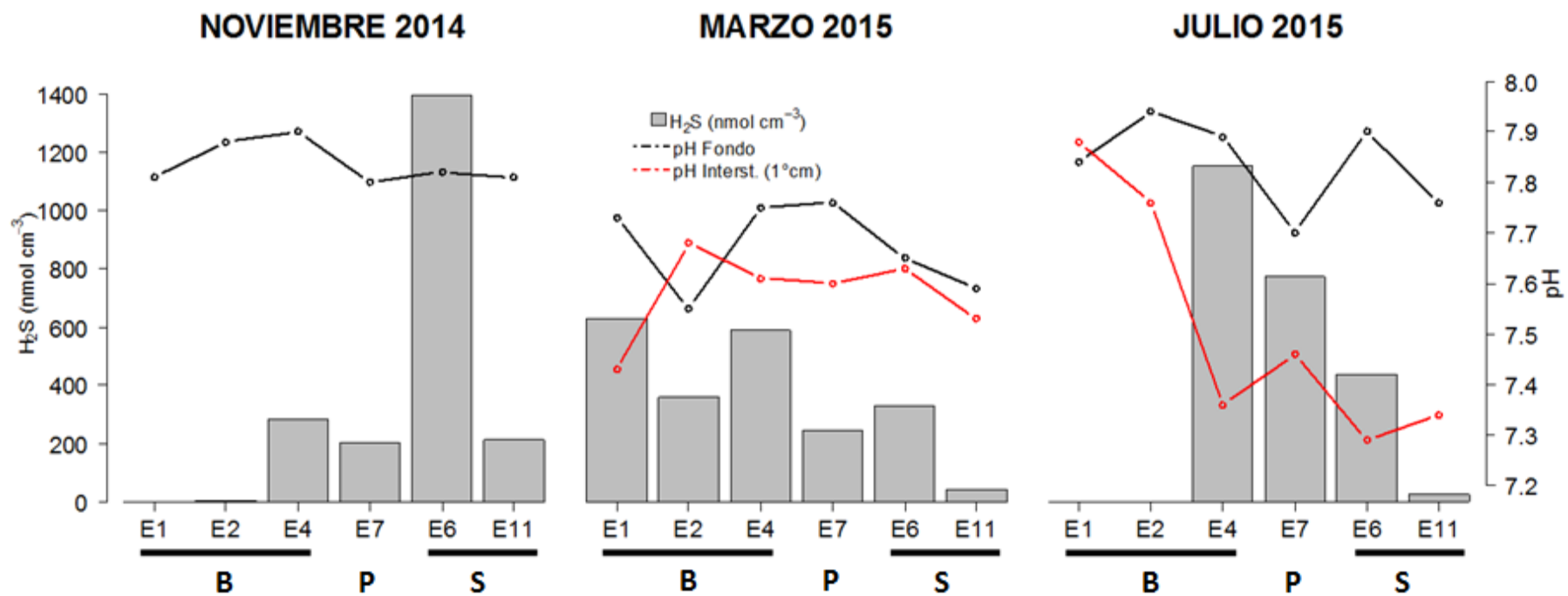


Figura 9. Niveles de sulfuro de hidrógeno ($nmol\ cm^{-3}$) y pH del agua intersticial del primer centímetro del sedimento y niveles de pH en el agua de fondo en las estaciones y temporadas de estudio.

4.1.4. Foraminíferos bentónicos

4.1.4.1. Características y variabilidad de la comunidad de foraminíferos bentónicos

La comunidad de foraminíferos bentónicos estuvo compuesta de 7 especies calcáreas, 1 taxón de formas tectináceas y dos especies y un taxón de formas aglutinadas. La lista de especies y el detalle de sus abundancias relativas respecto a cada zona del área de estudio se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Abundancias relativas promedio (%) de las especies de foraminíferos por zona y fracción de tamaño en el estudio.

Grupo ecológico	Especie	Zona								
		B			S			P		
		>150	>63	Total	>150	>63	Total	>150	>63	Total
Calcáreo	<i>Bolivina costata</i>	8.9	46.2	45.5	1.2	9.9	9.2	0.1	32.1	28.9
Calcáreo	<i>Buliminella elegantissima</i>	16.6	44.5	43.9	5.8	56.0	52.1	0.1	56.8	51.2
Calcáreo	<i>Nonionella auris</i>	1.6	0.0	0.1	69.1	2.9	7.9	78.2	4.3	11.7
Calcáreo	<i>Virgulinitella fragilis</i>	0.7	0.4	0.4	3.0	11.8	11.1	0.0	0.2	0.2
Calcáreo	<i>Ammonia</i> sp.	3.4	0.5	0.6	4.5	0.9	1.1	0.1	0.1	0.1
Calcáreo	<i>Bulimina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calcáreo	<i>Discorbis</i> sp.	0.0	0.1	0.1	3.7	1.3	1.4	1.2	0.2	0.3
Tectináceo	Allogromiidae	66.4	7.0	8.2	12.3	7.2	7.6	19.5	5.7	7.1
Aglutinado	<i>Reophax</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1
Aglutinado	<i>Textularia</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Aglutinado	Saccaminidae	2.4	1.3	1.3	0.0	9.7	8.9	0.8	0.5	0.5

Tomando en cuenta los factores espacial (zonas) y temporal (campanías), se pudo observar que hubo diferencias espaciales ($F_{(2,53)} = 9.98, p < 0.001$) y temporales ($F_{(2,53)} = 3.96, p = 0.026$) en la diversidad (riqueza) de especies de la comunidad de foraminíferos bentónicos. Estas indican que la zona exterior somera ‘S’ presentó mayor diversidad total de especies ($p < 0.1$) que las zonas ‘P’ y ‘B’, y que el mes

de julio de 2015 exhibió mayor diversidad de especies que los meses marzo de 2015 y noviembre de 2014 ($p < 0.1$) (anexo A8).

La abundancia total de foraminíferos bentónicos expresada como densidad total de foraminíferos en 50cm^3 de sedimento superficial varió en un rango entre 361 ind/ 50cm^3 y 7344 ind/ 50cm^3 y tuvo 3031 ind/ 50cm^3 como promedio en todo el estudio. La abundancia de foraminíferos bentónicos en la fracción de menor tamaño (63-150 μm) fue la que más aportó a la abundancia total. Esta fracción representó más de 91% del total en las 3 campañas de muestreo (anexo A7).

Hubo diferencias temporales significativas en la abundancia de toda la comunidad ($F_{(2,53)} = 4.62$, $p = 0.015$), pero no hubo diferencias espaciales. El mes de marzo de 2015 presentó mayores abundancias y el mes de noviembre de 2014, menores abundancias ($p < 0.1$). Julio de 2015 presentó abundancias intermedias (anexo A9).

El detalle de las abundancias de cada especie encontrada en las diferentes estaciones y campañas de muestreo se presentan en la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10. El aporte de las mismas en las dos fracciones de tamaño para cada estación y campaña de muestreo se presentan en la Figura 10.

Tabla 8. Densidades de foraminíferos (abundancias en 50cm³ de sedimento superficial) por especie y estación de muestreo en la campaña de noviembre de 2014, expresados como promedio (n=2) ± desviación estándar. *=especie presente en una sola réplica. S: riqueza de especies.

	NOVIEMBRE-2014								
	Zona B			Zona P		Zona S			
	E1	E2	E4	E7	E10	E6	E11	E16	E26
<i>B. costata</i>	15 ± 7	745 ± 612	2305 ± 825	215 ± 158	867 ± 367	98 ± 8	115 ± 19	256 ± 4	1064
<i>B. elegantissima</i>	69 ± 61	44 ± 27	342 ± 168	73*	90 ± 70	562 ± 62	932 ± 184	2079 ± 341	192
<i>N. auris</i>	0	0	0	1*	100 ± 55	20*	316 ± 301	231 ± 41	0
<i>V. fragilis</i>	0	13 ± 2	0	0	0	6*	376 ± 98	1031 ± 21	736
<i>Ammonia</i> sp.	1*	84 ± 81	0	14*	0	11 ± 1	26*	5*	0
<i>Bulimina</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	5*	0
<i>Discorbis</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Allogromiidae	270 ± 170	957 ± 865	155 ± 62	64 ± 6	400 ± 315	539 ± 528	154 ± 54	114 ± 16	888
<i>Reophax</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	35 ± 25	32
<i>Textularia</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	88
Saccaminiidae	4*	0	0	0	0	2*	0	0	0
Calcáreos	43 ± 65	443 ± 671	1323 ± 1498	152 ± 231	528 ± 504	349 ± 348	882 ± 565	1803 ± 1609	996 ± 988
Tectinaceos	135 ± 143	478 ± 656	78 ± 49	32 ± 22	200 ± 195	270 ± 408	77 ± 39	57 ± 26	444 ± 284
Aglutinados	2 ± 3	0	0	0	0	1 ± 1	0	18 ± 25	60 ± 60
N Total	60 ± 111	307 ± 610	467 ± 1104	61 ± 155	243 ± 398	206 ± 359	320 ± 539	626 ± 1303	500 ± 739
S total	5	5	3	5	4	7	6	8	6
S calc.	3	4	2	4	3	5	4	6	3

Tabla 9. Densidades de foraminíferos (abundancias en 50cm³ de sedimento superficial) por especie y estación de muestreo en la campaña de marzo de 2014, expresados como promedio (n=2) ± desviación estándar. *=especie presente en una sola réplica. S: riqueza de especies.

	MARZO-2015								
	Zona B			Zona P		Zona S			
	E1	E2	E4	E7	E10	E6	E11	E16	E26
<i>B. costata</i>	187 ± 62	2774 ± 399	2046 ± 86	1215 ± 57	1177 ± 315	143 ± 85	157 ± 145	470 ± 292	462 ± 84
<i>B. elegantissima</i>	1658 ± 286	1777 ± 251	1546 ± 459	4409 ± 2682	2170 ± 806	4766 ± 2023	1169 ± 226	2817 ± 1317	2067 ± 574
<i>N. auris</i>	0	1*	1*	883 ± 694	56 ± 7	186 ± 55	331 ± 176	190 ± 77	27*
<i>V. fragilis</i>	0	35 ± 7	0	0	0	219 ± 55	141 ± 66	182 ± 85	567 ± 229
<i>Ammonia</i> sp.	0	10*	0	0	0	122 ± 105	147 ± 124	0	0
<i>Bulimina</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Discorbis</i> sp.	0	16*	0	21*	0.0	399 ± 169	74 ± 50	3*	0
Allogromiidae	110 ± 74	268 ± 128	1*	557 ± 536	100 ± 4	44*	83 ± 26	202 ± 122	212 ± 59
<i>Reophax</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	8*	6*
<i>Textularia</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	20 ± 2
Saccaminiidae	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcáreos	922 ± 953	2306 ± 2297	1796 ± 1768	3275 ± 3498	1702 ± 1707	2917 ± 3148	1245 ± 1068	1831 ± 2007	1562 ± 1688
Tectinaceos	55 ± 64	134 ± 145	0	279 ± 285	50 ± 44	22 ± 38	42 ± 33	101 ± 97	106 ± 103
Aglutinados	0	0	0	0	0	0	0	4 ± 7	13 ± 14
N Total	326 ± 726	813 ± 1773	599 ± 1385	1184 ± 2622	584 ± 1320	980 ± 2377	429 ± 882	645 ± 1495	560 ± 1261
S total	3	7	4	5	4	7	7	7	7
S calc.	2	6	3	4	3	6	6	5	4

Tabla 10 Densidades de foraminíferos (abundancias en 50cm³ de sedimento superficial) por especie y estación de muestreo en la campaña de julio de 2014, expresados como promedio (n=2) ± desviación estándar. *=especie presente en una sola réplica. S: riqueza de especies.

	JULIO-2015								
	ZONA B			ZONA P		ZONA S			
	E1	E2	E4	E7	E10	E6	E11	E16	E26
<i>B. costata</i>	194 ± 34	1112 ± 5	782 ± 185	164 ± 36	1384 ± 848	101 ± 64	130 ± 4	444 ± 23	433 ± 208
<i>B. elegantissima</i>	2937 ± 1069	1100 ± 175	338 ± 138	565 ± 20	1599 ± 292	2739 ± 1288	1398 ± 243	2375 ± 1119	385 ± 65
<i>N. auris</i>	9 ± 5	2*	1*	31 ± 14	959 ± 890	1386 ± 1331	138 ± 32	440 ± 168	82 ± 80
<i>V. fragilis</i>	27*	14*	0	0	37*	311 ± 145	445 ± 266	579 ± 473	74 ± 26
<i>Ammonia</i> sp.	40 ± 27	0	0	5*	0	156 ± 147	15 ± 6	2 ± 1	0
<i>Bulimina</i> sp.	0	0	0	1*	0	0	0	0	0
<i>Discorbis</i> sp.	0	0	0	11 ± 3	0	101 ± 92	24*	0	9 ± 7
Allogromiidae	40 ± 13	5*	21 ± 5	55 ± 31	58 ± 25	74 ± 37	26*	30 ± 28	821 ± 805
<i>Reophax</i> sp.	0	0	0	7*	2*	0	5*	4*	0
<i>Textularia</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	8*	13*
Saccaminiidae	131 ± 86	157 ± 119	0	63 ± 53	25*	0	0	3461 ± 3445	302 ± 174
Calcáreos	1603 ± 1756	1114 ± 1113	561 ± 581	389 ± 383	1989 ± 1481	2398 ± 1543	1074 ± 991	1921 ± 2102	492 ± 484
Tectinaceos	20 ± 22	2 ± 4	11 ± 8	28 ± 35	29 ± 31	37 ± 45	13 ± 17	15 ± 24	410 ± 701
Aglutinados	65 ± 86	79 ± 115	0	35 ± 42	14 ± 20	0	3 ± 5	1736 ± 2984	157 ± 205
N Total	563 ± 1309	398 ± 857	190 ± 445	150 ± 292	677 ± 1318	811 ± 1496	363 ± 796	1224 ± 2377	353 ± 549
S total	7	6	4	9	7	7	8	9	8
S calc.	5	4	3	6	4	6	6	5	5

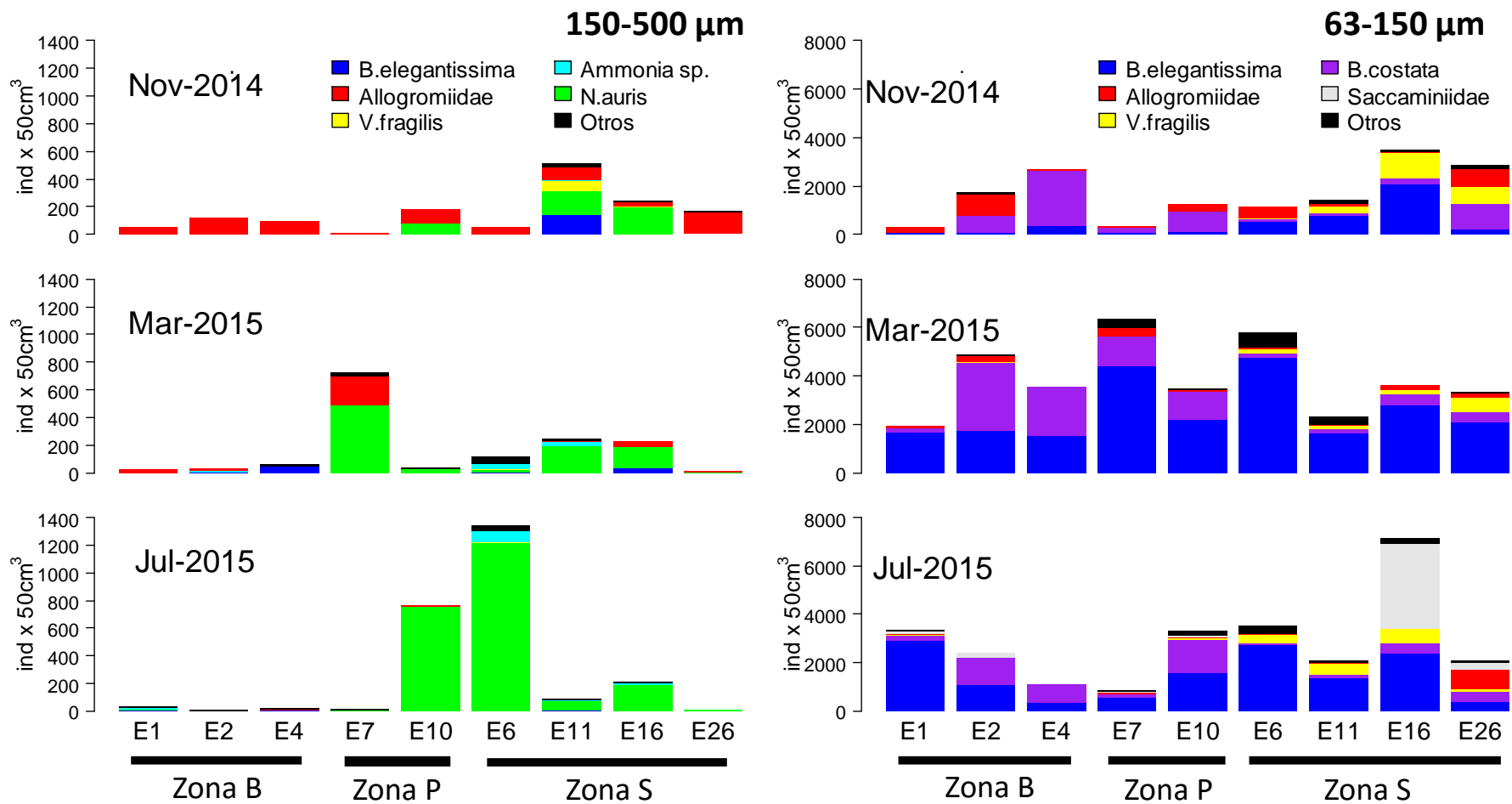


Figura 10. Abundancias (n° de individuos x 50cm³) de las principales especies de foraminíferos del centímetro superficial del sedimento, por estación de muestreo y temporada de muestreo, en las fracciones de tamaño de 150-500 µm (izquierda) y de 63-150 µm (derecha).

4.1.4.2. Variabilidad del grupo de foraminíferos no calcáreos

Los foraminíferos calcáreos fueron los más dominantes en la comunidad, sobre todo en la campaña de marzo de 2015, donde representaron el 95% del total de la abundancia total de foraminíferos (Figura 11). Sin embargo, los foraminíferos no calcáreos fueron aproximadamente 22% del total en noviembre de 2014, representados principalmente por los foraminíferos tectináceos del taxón *Allogromiidae*, mientras que en julio de 2015 fueron aproximadamente 18% del total, representados principalmente por los foraminíferos aglutinados (Figura 11). Las diferencias temporales en la abundancia relativa del grupo de foraminíferos no calcáreos fueron significativas tanto en la comunidad total ($F(2,53) = 9.98$, $p = 0.001$) como en la fracción de menor ($F(2,53) = 5.98$, $p = 0.005$) y mayor tamaño ($F(2,51) = 21.6$, $p < 0.001$). El mes de noviembre de 2014 presentó mayor abundancia relativa de este grupo que los otros meses ($p < 0.1$). Solamente hubo diferencias espaciales significativas en la fracción de mayor tamaño ($F(2,51) = 7.64$, $p = 0.001$), ya que la zona 'S' tuvo menor abundancia relativa del grupo no calcáreo que las zonas 'P' y 'B' ($p < 0.1$) (Figura 13, Anexo 10).

Las abundancias relativas de los foraminíferos bentónicos no calcáreos (tectináceos y aglutinados) por estación y temporada de muestreo se presentan en la Figura 12. El aporte de las principales *taxa* no calcáreas (*Allogromiidae* y *Saccaminidae*) en las dos fracciones de tamaño para cada estación y campaña de muestreo se muestra en la Figura 10.

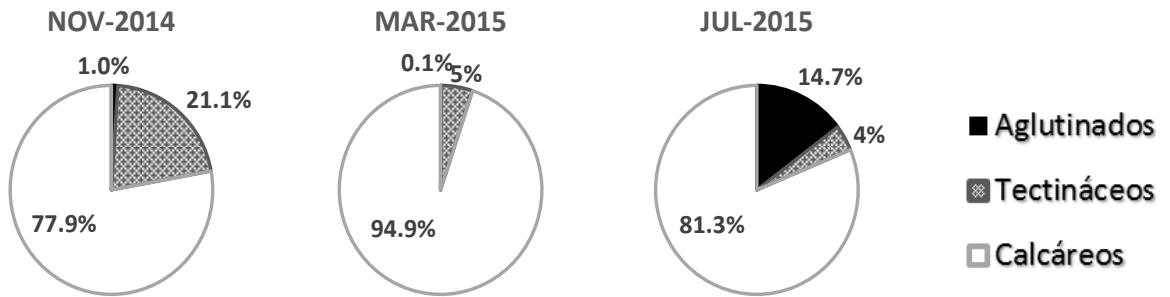


Figura 11. Representación en porcentaje de las abundancias de los foraminíferos bentónicos por grupo ecológico, del total de la comunidad, en los meses de muestreo

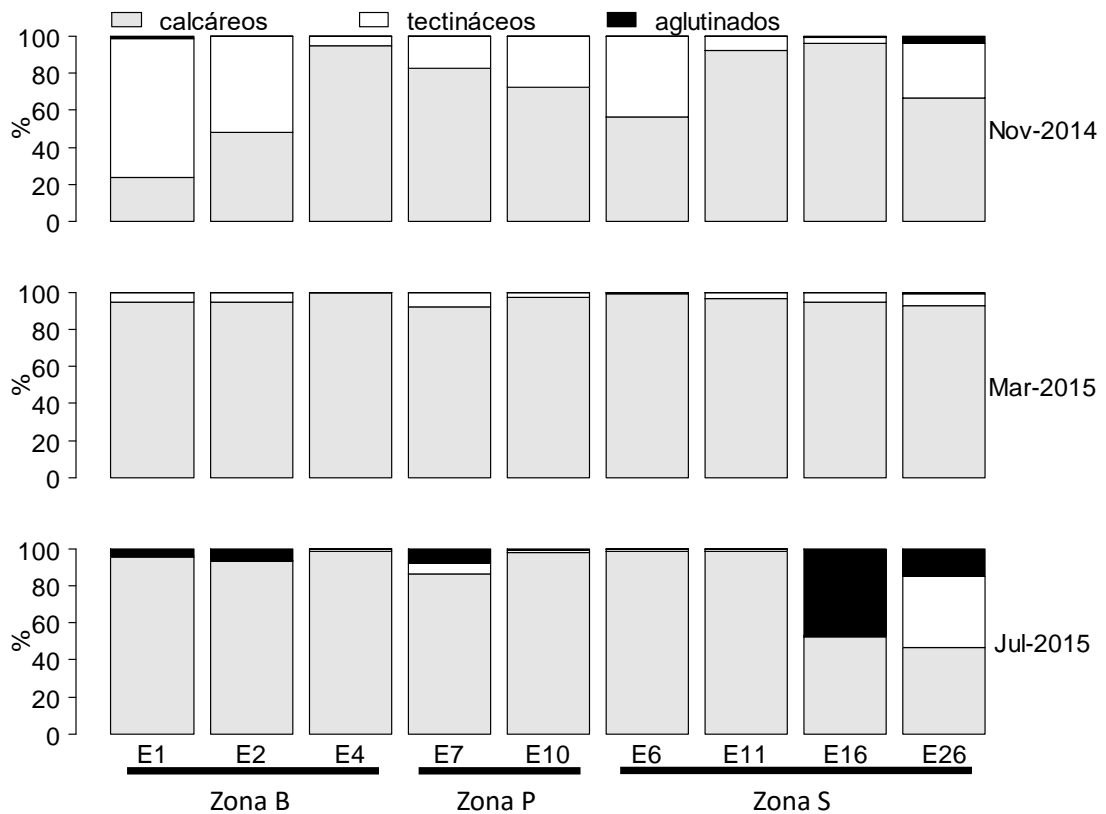


Figura 12. Abundancias relativas (%) de los grupos ecológicos en la comunidad total de foraminíferos bentónicos del centímetro superficial del sedimento por estación y temporada de muestreo.

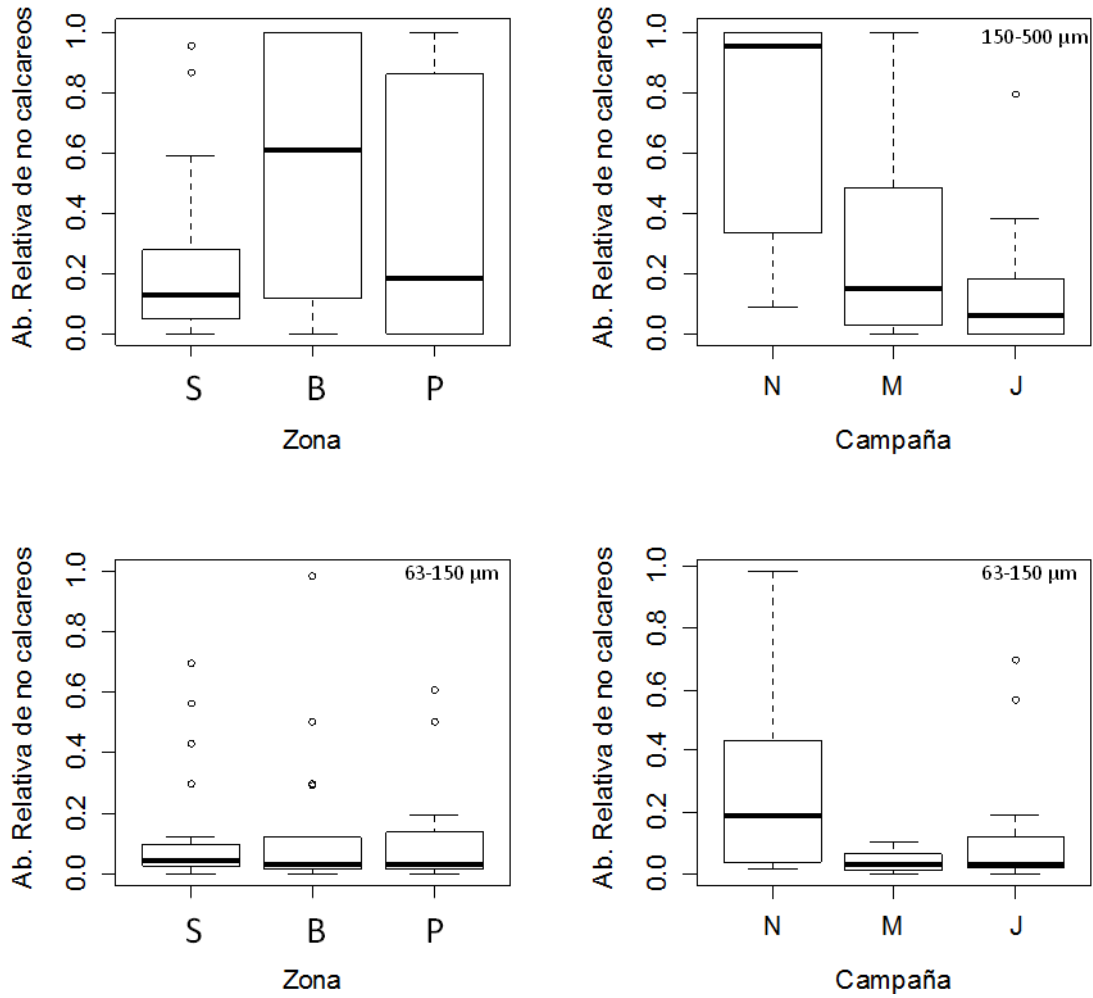


Figura 13. Abundancias relativas de foraminíferos no calcáreos respecto al factor tiempo (campañas) y al factor espacio (zona) en las dos fracciones de tamaño (arriba: 150-500 μm, abajo: 63-150 μm).

4.1.4.3. Variabilidad del grupo de foraminíferos calcáreos

La diversidad (riqueza) de especies calcáreas presentó diferencias espaciales ($F_{(2,53)} = 7.01, p < 0.002$), pero no temporales, ya que la zona exterior somera 'S' presentó mayor número de especies ($p < 0.1$) que las zonas 'P' y 'B' (Anexo 8). También hubo diferencias temporales significativas ($F_{(2,53)} = 9.23, p < 0.001$), mas no así espaciales, en la abundancia del grupo de foraminíferos calcáreos. El mes de marzo de 2015 presentó mayores abundancias que los otros dos meses ($p < 0.1$) (Anexo 9). Pese a que no hay diferencias significativas entre noviembre de 2014 y julio de 2015, se encontraron las menores abundancias en el primero (Figura 14).

Del conjunto de foraminíferos bentónicos calcáreos, *Bulimina* sp. fue encontrada solo en dos muestras, razón por la cual se excluyó de los posteriores análisis. De las seis especies calcáreas importantes, dos especies fueron más resistentes a la manipulación en laboratorio y presentaron testas más robustas que el resto: *Buliminella elegantissima* y *Bolivina costata* (Tabla 11)

Para poner en evidencia las diferencias espaciales en la comunidad de foraminíferos bentónicos, se condujo el análisis de clasificación en modo Q de la matriz de abundancias relativas, promediadas para las tres campañas, de las especies calcáreas importantes. El resultado del análisis confirma la agrupación de estaciones de muestreo establecida inicialmente en la metodología (Figura 15). El mismo análisis en modo R, sugiere una mayor asociación entre *B. costata* y *B. elegantissima*, las dos especies de testa más robusta en el estudio. Además, un análisis clúster adicional en base a la matriz de presencia y ausencia de las especies calcáreas también presenta la fuerte asociación entre las especies más robustas.

Debido a la fuerte asociación entre estas dos especies robustas, se analizó también las diferencias espacio-temporales de la proporción que los foraminíferos calcáreos robustos representan del total de foraminíferos calcáreos en ambas fracciones de tamaños. En la fracción de mayor tamaño, esta proporción mostró diferencias espaciales significativas ($H(2) = 16.84, p < 0.001$) y fue la zona “B” la que presentó los mayores valores. En la fracción de menor tamaño, la proporción de los foraminíferos calcáreos robustos también presentaron diferencias espaciales ($F(2,51) = 22.98, p < 0.001$). La zona “S” presentó las menores abundancias y la zona “B”, las mayores ($p < 0.1$) (Figura 18, Anexo A11).

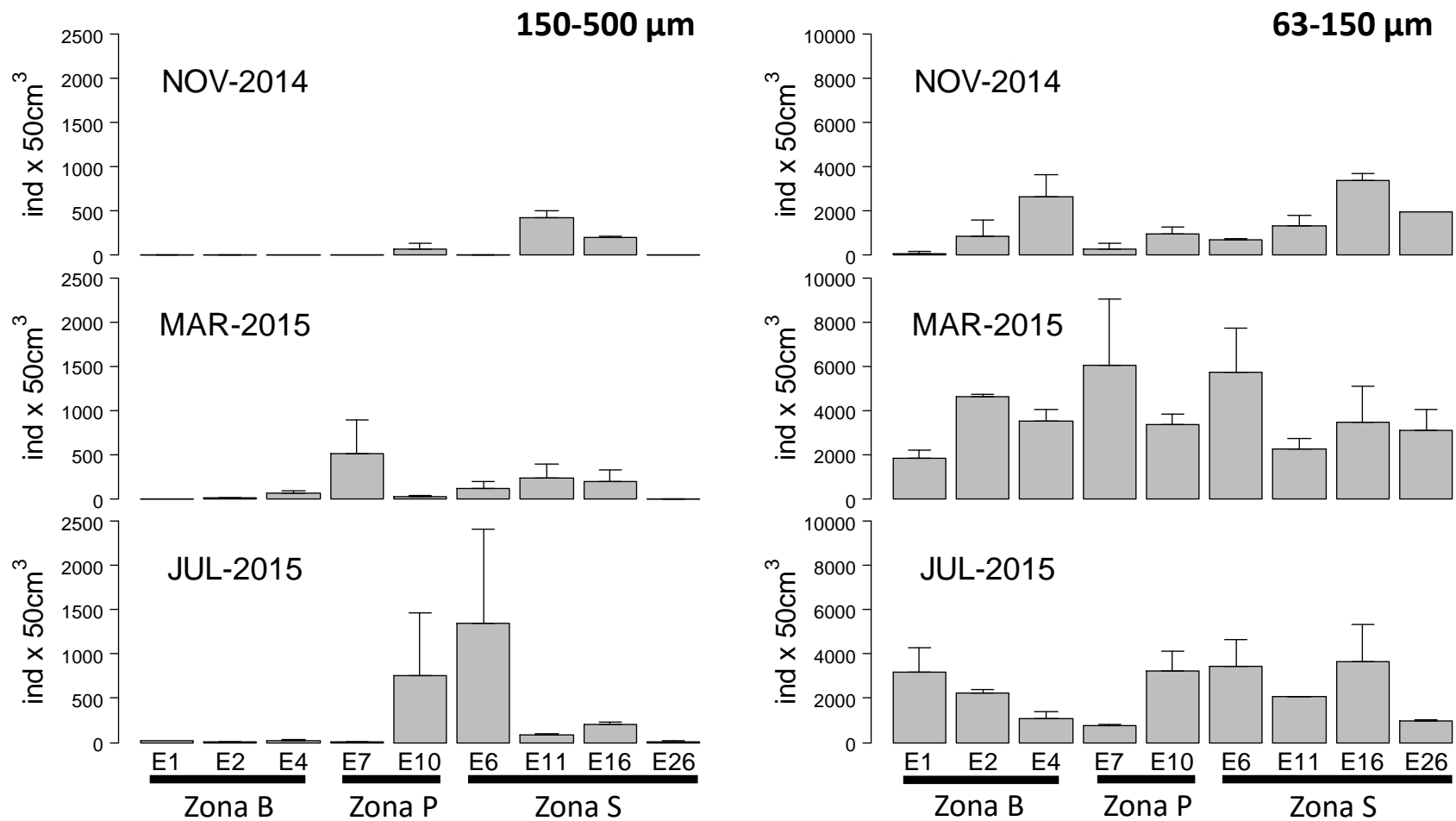
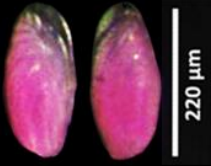


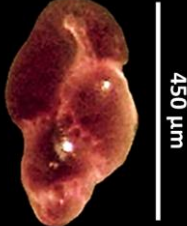
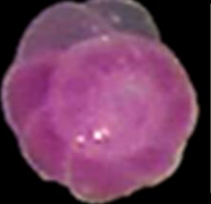



Figura 14. Abundancias (n° de individuos x 50cm³) de foraminíferos bentónicos calcáreos del centímetro superficial del sedimento, por estación de muestreo y temporada de muestreo, en las fracciones de tamaño de 150-500 µm (izquierda) y de 63-150 µm (derecha).

Tabla 11. Descripción de las principales especies calcáreas del estudio

Especie	Descripción	Foto
<i>Buliminella elegantissima</i> (D'Orbigny, 1839)	Especie calcárea hialina de testa robusta, translúcida y con un arreglo en espiral de sus cámaras (Mallon 2011). Usualmente de pequeño tamaño y resistente a la manipulación en este estudio.	
<i>Bolivina costata</i> (D'Orbigny, 1839)	Especie calcárea hialina de testa robusta, translúcida y cubierta de poros, con un arreglo biserial de sus cámaras. Superficie cubierta por varias costillas longitudinales muy desarrolladas (Mallon 2011). Usualmente de pequeño tamaño y resistente a la manipulación en este estudio.	
<i>Nonionella auris</i> (D'Orbigny, 1839)	Especie calcárea hialina de testa redondeada con un arreglo de cámaras moderadamente infladas en una espiral plana (Mallon 2011). De mediano tamaño, relativamente quebradizo a la manipulación en este estudio.	
<i>Virgulinea fragilis</i> (Grindell & Collen, 1976)	Especie calcárea hialina de testa muy delicada y frágil como todas las especies actuales de este género (Haman et al. 1993). Con un arreglo triserial de cámaras y muy quebradizo a la manipulación en este estudio.	
<i>Ammonia</i> sp.	Especie calcárea hialina con arreglo de cámaras troco-espiral. Este género presenta algunas especies susceptibles a la disolución (Le Cadre et al. 2003; Haynert et al. 2012). De testa relativamente quebradiza a la manipulación en este estudio.	
<i>Discorbis</i> sp.	Especie calcárea hialina translúcida y cubierta de poros. Sus cámaras tienen un arreglo en espiral plana y su lado dorsal es convexo (Verano 1974). De testa muy quebradiza a la manipulación en este estudio.	

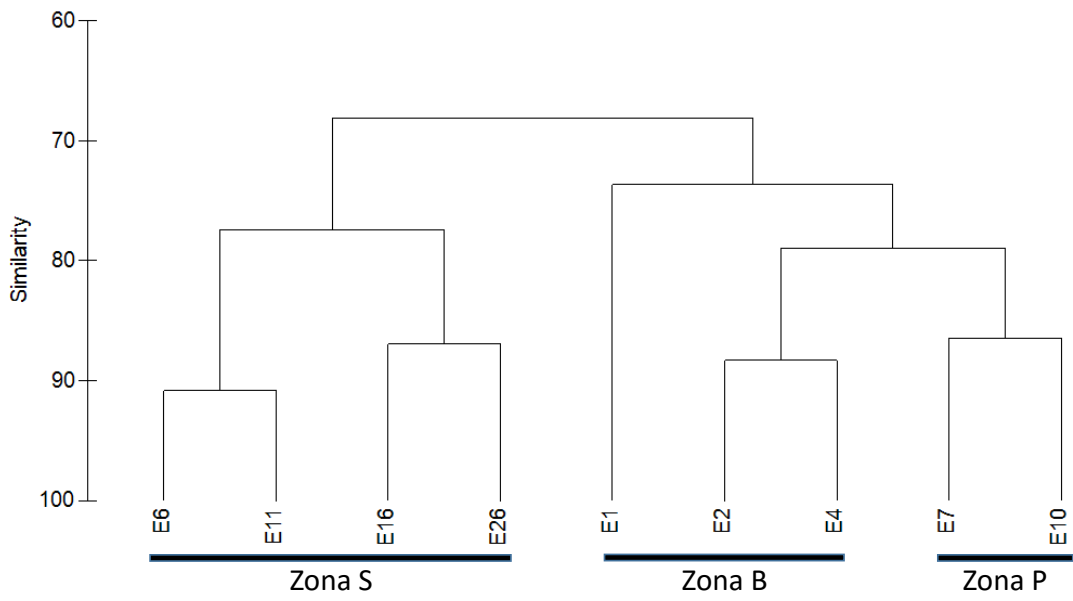


Figura 15. Dendrograma de similaridad (Bray-Curtis) en base al análisis *cluster* en modo Q de las abundancias relativas de las especies calcáreas

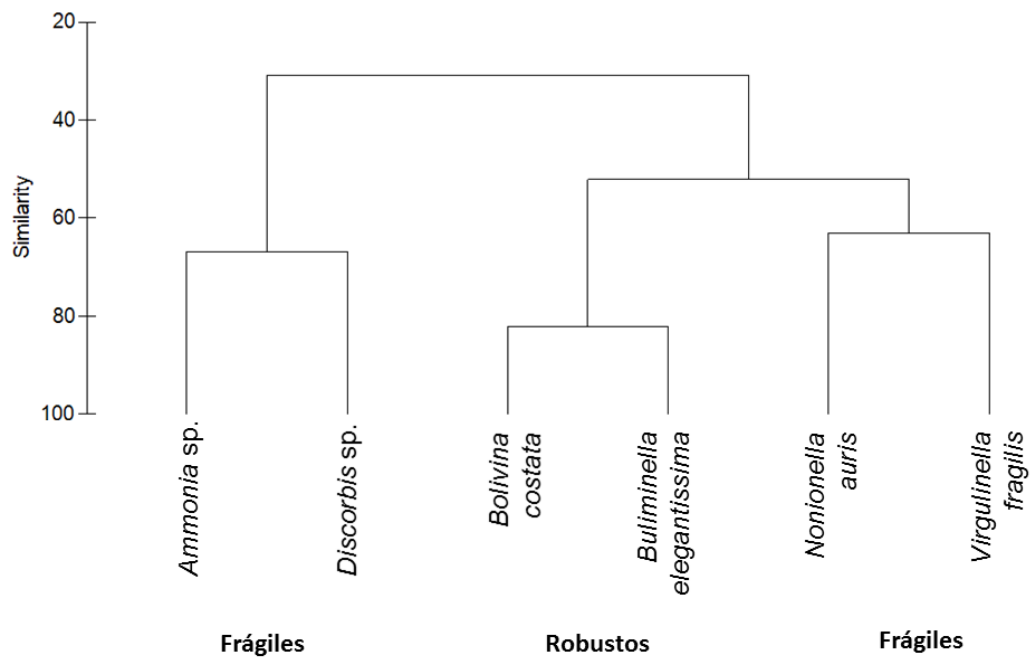


Figura 16 . Dendrograma de similaridad (Bray-Curtis) en base al análisis *cluster* en modo R de las abundancias relativas de las especies calcáreas

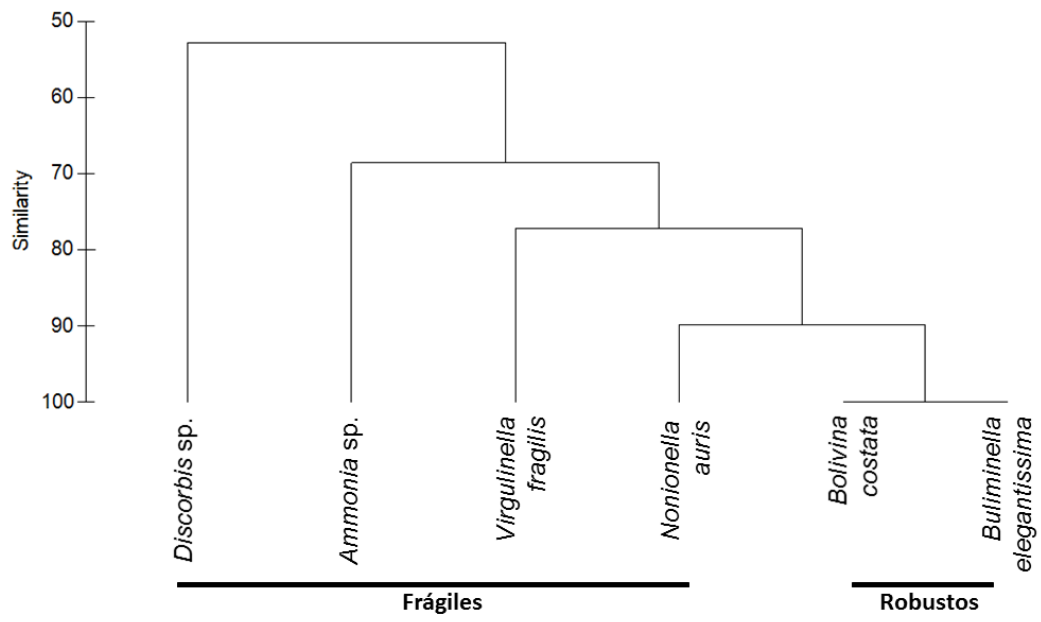


Figura 17. Dendrograma de similaridad (índice de Jaccard) en base al análisis *cluster* en modo R de los datos de presencia/ausencia de las especies calcáreas

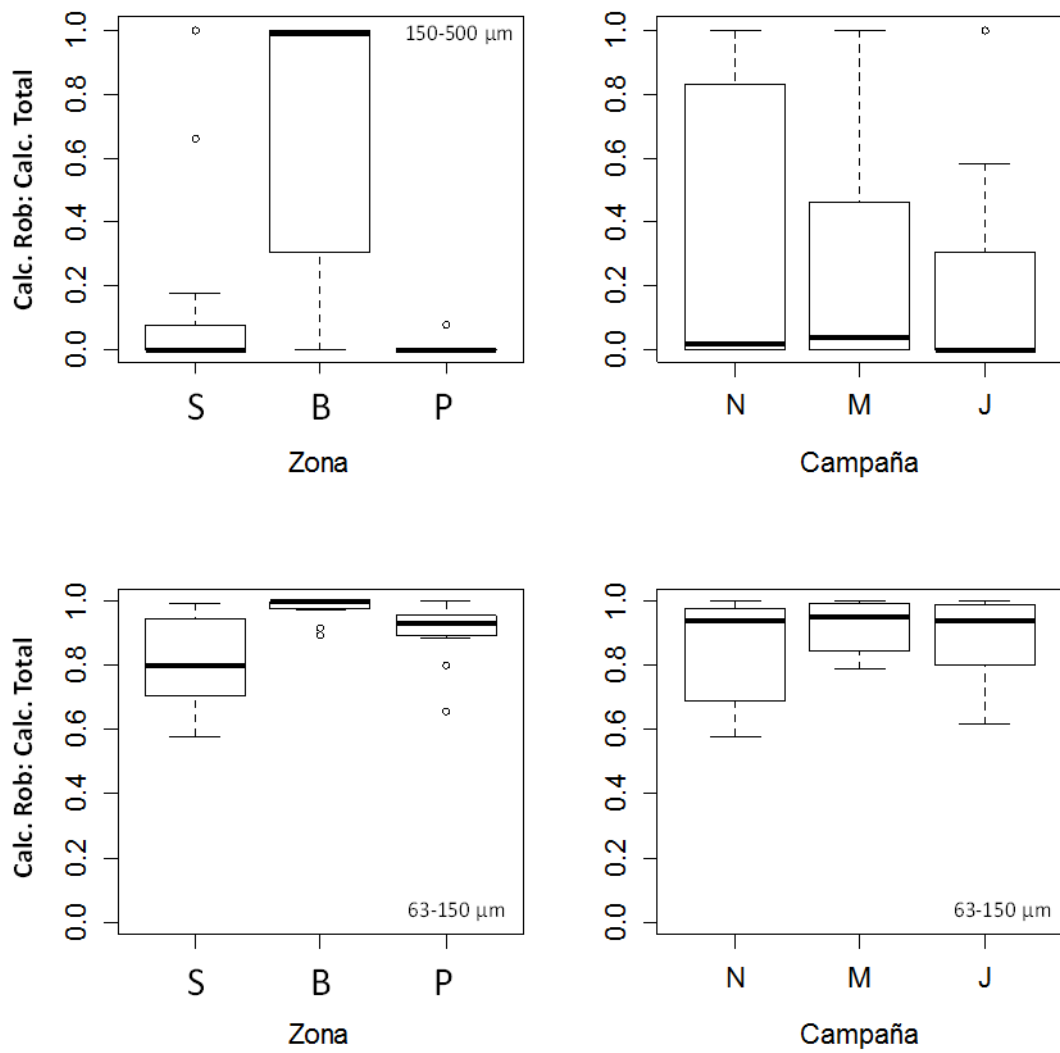


Figura 18. Proporción de los foraminíferos calcáreos robustos del total de foraminíferos calcáreos respecto al factor tiempo (campañas) y al factor espacio (zona) en las dos fracciones de tamaño.

4.1.4.4. Testas vacías de foraminíferos calcáreos

Las abundancias de las testas vacías fueron consideradas por separado de la comunidad para las dos fracciones de tamaño. El número de testas calcáreas vacías en la fracción de mayor tamaño mostró diferencias espaciales ($F_{(2,53)} = 7.45$, $p = 0.001$) y temporales ($F_{(2,51)} = 7.69$, $p = 0.001$) significativas. La zona “B” presentó los menores números en comparación a las otras dos zonas y el mes de noviembre presentó los menores números en comparación a los otros dos meses ($p < 0.1$). En la fracción de menor tamaño las diferencias espaciales ($F_{(2,53)} = 5.08$, $p = 0.010$) señalan que la zona con menor número de testas vacías es la zona “B” y la que tiene mayor número es la zona “S” ($p < 0.1$). Las diferencias temporales ($F_{(2,53)} = 12.17$, $p < 0.001$) señalan que el mes de noviembre presentó menores números en comparación a los otros dos meses ($p < 0.1$) (Anexo 12). Mayores detalles de las abundancias de testas vacías se pueden observar en la Tabla 12. Al igual que en la comunidad viva, la abundancia de individuos muertos en la fracción menor (63-150 μm) puede llegar a ser hasta de un orden de magnitud superior a la abundancia de individuos en la fracción mayor (150-500 μm).

Otra variable considerada en esta sección es la proporción que el número de testas vacías representa de la totalidad de individuos calcáreos (vivos y muertos). Los valores de esta proporción más cercanos a 0 indican malas condiciones de preservación (disolución) de las testas vacías, mientras que los valores más cercanos a 1, las mejores condiciones de preservación de testas vacías. Esta proporción fue también considerada por separado para las dos fracciones de tamaño.

La fracción porcentual que las testas vacías representan del total de testas calcáreas (vivos y muertos) en la fracción de mayor tamaño mostró diferencias temporales significativas ($F_{(2,53)} = 4.67, p = 0.015$) que señalan que el mes de noviembre presentó los menores valores de esta razón y el mes de marzo los mayores valores ($p < 0.1$). En la fracción de menor tamaño las diferencias temporales ($F_{(2,51)} = 4.98, p = 0.011$) señalan que el mes de noviembre tuvo los menores valores de esta razón a comparación de los otros dos meses ($p < 0.1$), y las diferencias espaciales ($F_{(2,51)} = 3.36, p = 0.044$) señalan que la zona “B” tuvo los menores valores de este cociente y la zona “S”, los mayores ($p < 0.1$) (Figura 20, Anexo 12). Mayores detalles de las abundancias de testas vacías se pueden observar en la Tabla 13. Se puede advertir también que en el mes de noviembre se encontraron los valores más bajos de este cociente, en ambas fracciones de tamaño, indicando mayores condiciones de disolución. Además, se observa que los valores más cercanos a 1 (mejores condiciones de preservación) se encuentran principalmente en la fracción de mayor tamaño.

Tabla 12. Densidad (abundancia en 50cm³ de sedimento superficial) de testas calcáreas vacías por estación y campañas de muestreo expresados como promedio (n=2) ± desviación estándar.

Zona	Est.	N° muertos (63-150 μm)			N° muertos (150-500 μm)		
		N	M	J	N	M	J
B	1	7 ± 2	99 ± 3	1240 ± 5	2 ± 2	3 ± 3	28 ± 5
	2	21 ± 0	1550 ± 12	1206 ± 5	0 ± 0	15 ± 12	10 ± 5
	4	10 ± 0	2953 ± 4	1918 ± 36	0 ± 0	117 ± 4	86 ± 36
P	7	288 ± 1	2036 ± 1539	1871 ± 23	6 ± 1	1698 ± 1539	116 ± 23
	10	30 ± 0	3889 ± 5	1253 ± 85	0 ± 0	634 ± 5	490 ± 85
S	6	5494 ± 178	10783 ± 1834	15010 ± 1600	188 ± 178	2080 ± 1834	2484 ± 1600
	11	5144 ± 1962	15248 ± 748	2363 ± 131	2066 ± 1962	2272 ± 748	798 ± 131
	16	1446 ± 115	3541 ± 200	1382 ± 39	115 ± 115	677 ± 200	176 ± 39
	26	168.0 ± 0.0	650 ± 9	450 ± 24	8 ± 0	9 ± 9	23.5 ± 23.5

Tabla 13. Razón del número de testas calcáreas vacías entre el número de testas calcáreas totales, por estación y campañas de muestreo: promedio (n=2) ± desviación estándar.

Zona	Est.	T. vacías : Total (63-150 μm)			T. vacías : Total (150-500 μm)		
		N	M	J	N	M	J
B	1	0.20 ± 0.14	0.04 ± 0.04	0.30 ± 0.13	0.12 ± 0.12	0.36 ± 0.36	0.54 ± 0.04
	2	0.03 ± 0.01	0.24 ± 0.07	0.30 ± 0.18	0.00 ± 0.00	0.46 ± 0.19	0.62 ± 0.01
	4	0.00 ± 0.00	0.46 ± 0.01	0.64 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.64 ± 0.06	0.81 ± 0.05
P	7	0.28 ± 0.23	0.30 ± 0.13	0.70 ± 0.04	1.00 ± 0.00	0.56 ± 0.41	0.94 ± 0.00
	10	0.03 ± 0.00	0.53 ± 0.09	0.26 ± 0.06	0.00 ± 0.00	0.96 ± 0.02	0.59 ± 0.31
S	6	0.63 ± 0.30	0.66 ± 0.01	0.81 ± 0.00	0.79 ± 0.21	0.92 ± 0.03	0.60 ± 0.33
	11	0.45 ± 0.40	0.79 ± 0.11	0.38 ± 0.31	0.55 ± 0.37	0.88 ± 0.09	0.90 ± 0.00
	16	0.23 ± 0.21	0.50 ± 0.01	0.31 ± 0.11	0.27 ± 0.27	0.81 ± 0.08	0.47 ± 0.10
	26	0.08 ± 0.00	0.17 ± 0.02	0.25 ± 0.25	0.50 ± 0.00	0.43 ± 0.43	0.38 ± 0.38

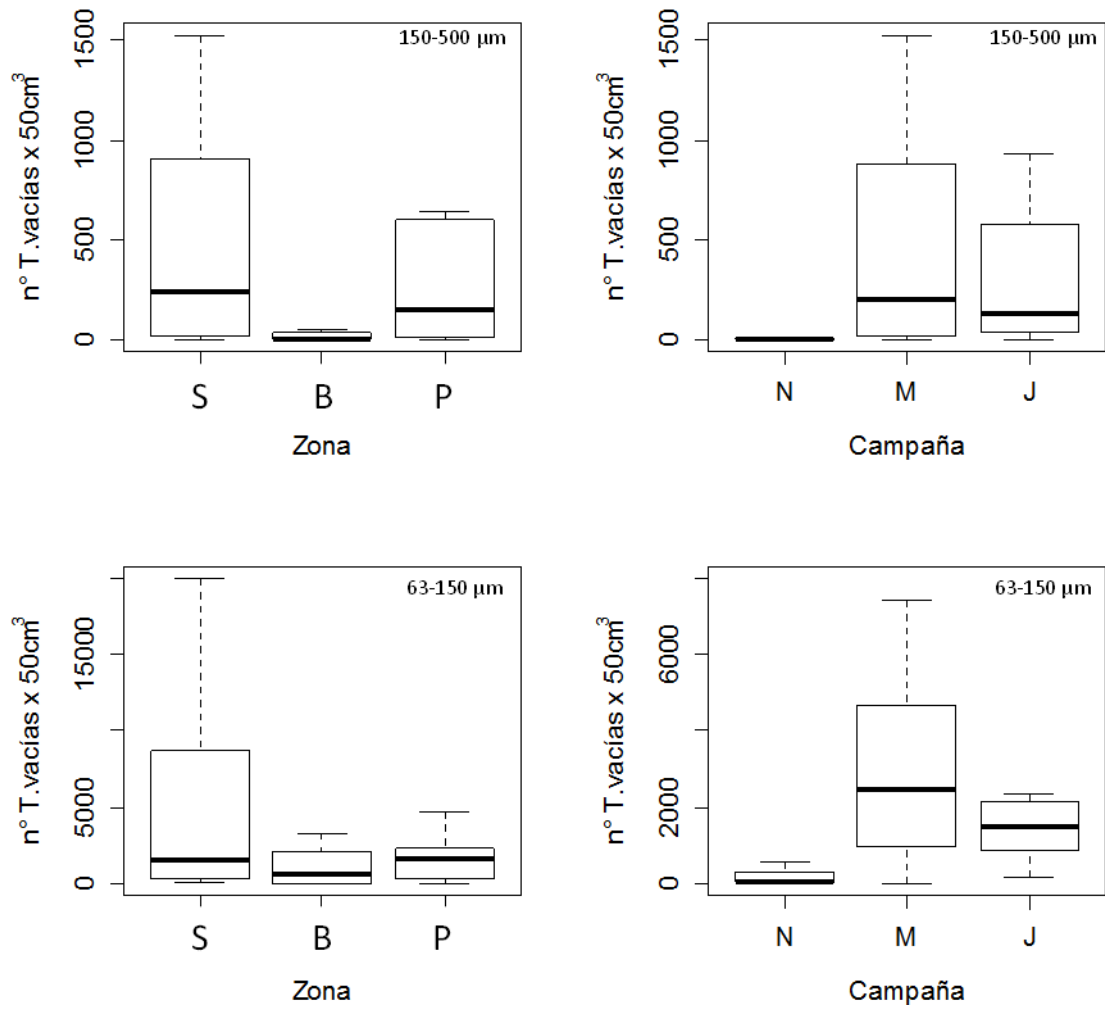


Figura 19. Número de testas calcáreas vacías respecto al factor tiempo (campañas) y al factor espacio (zona) en las dos fracciones de tamaño

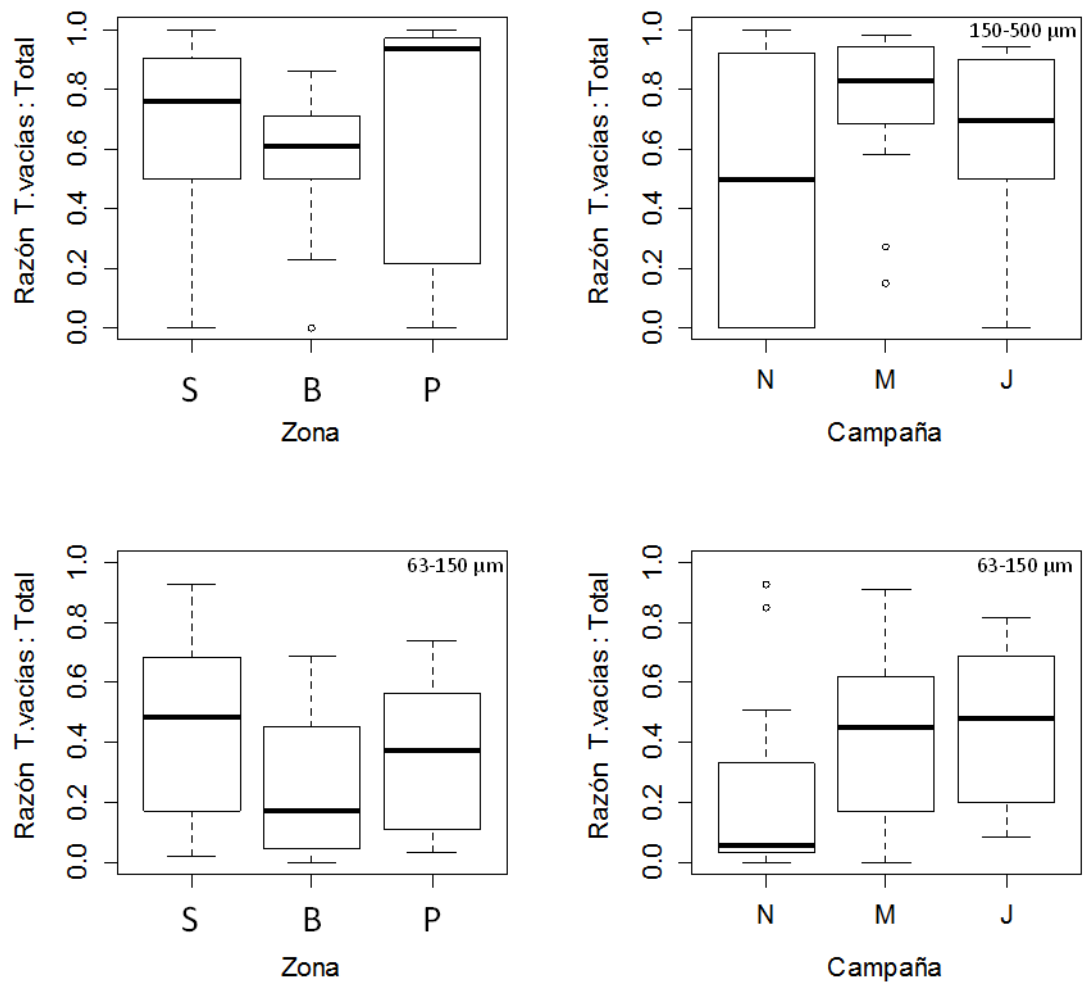


Figura 20. Proporción de las testas calcáreas vacías del total de testas calcáreas (vivos y muertos) respecto al factor tiempo (campañas) y al factor espacio (zona) en las dos fracciones de tamaño.

4.2. Estudio temporal en la Bahía Paracas

4.2.1. Variabilidad en Puerto San Martín

En esta sección, los datos históricos ambientales tomados a media agua (5 metros de la superficie) frente a Puerto San Martín en el programa de Sistema de Respuesta Temprana de Pluspetrol, se presentan desde el 1 de enero de 2014 hasta el 7 de julio de 2015, fecha que culmina este estudio. Sin embargo, las climatologías presentadas en algunos gráficos fueron calculadas con todos los datos originales registrados desde enero de 2006 hasta setiembre de 2015.

En este periodo, la temperatura diaria (Figura 21) mostró mínimos valores en los meses de invierno-primavera y los máximos valores en los meses de verano e inicios de otoño. El comportamiento de la temperatura en esta ventana de tiempo fue muy similar al patrón de la climatología. Además, la diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura a media agua indica que en los meses de verano e inicios de otoño se dan frecuentemente condiciones estratificadas, mientras que en los meses de invierno y primavera las condiciones son más mezcladas.

La serie de oxígeno disuelto a media agua frente a Puerto San Martín mostró en general valores por encima de la hipoxia costera (1.43 mL L^{-1}), salvo algunos eventos hipóxicos en verano e inicios de otoño. La climatología muestra que los niveles de oxígeno son menores entre febrero y marzo y son mayores entre mayo y setiembre. El comportamiento del oxígeno en esta ventana de tiempo muestra que en 2014 hubo niveles de oxígeno menores a los de la climatología, especialmente en los eventos de hipoxia mostrados en la Figura 22.

La serie de pH a media agua frente a Puerto San Martín presentó un valor promedio de 7.77 y una mediana de 7.76, lo cual indica que la distribución de los datos de pH entre 2014 y 2015 fue simétrica en un rango que estuvo entre 7.35 y 8.40. No se observó una señal estacional en la serie, sin embargo, hubo eventos de muy bajo pH en los meses de marzo, julio y enero. El promedio del pH entre 2014 y 2015 (7.77) fue ligeramente menor al promedio de todos los años de la serie original (7.79).

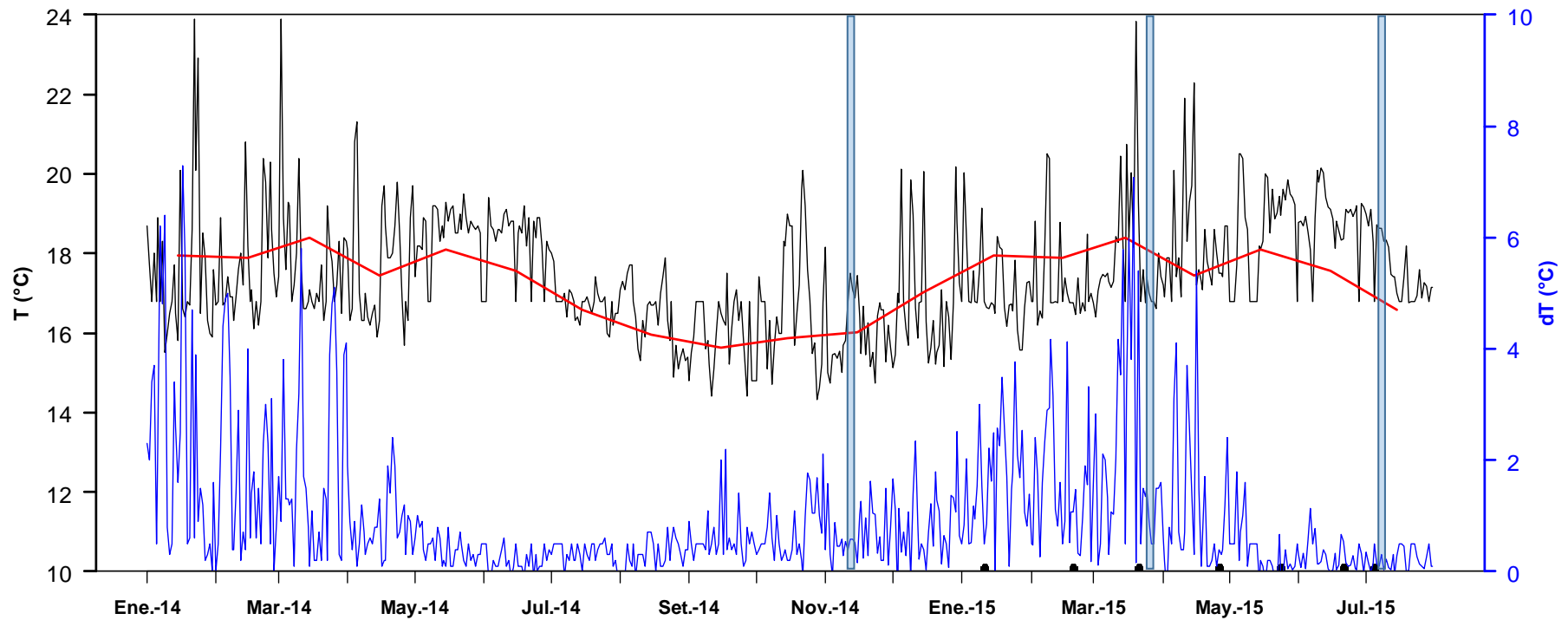


Figura 21. Serie diaria de temperatura a 5 metros de profundidad frente a Puerto San Martín (línea negra) del programa SRT de Pluspetrol. Diferencia entre temperatura superficial y a 5 metros de profundidad (línea azul). Climatología mensual de la temperatura a 5 metros de profundidad, basada en el periodo 2006 - 2015. Las bandas indican el periodo de duración de las campañas de muestreo espacio-estacional y los puntos negros, los días de muestreo en el monitoreo.

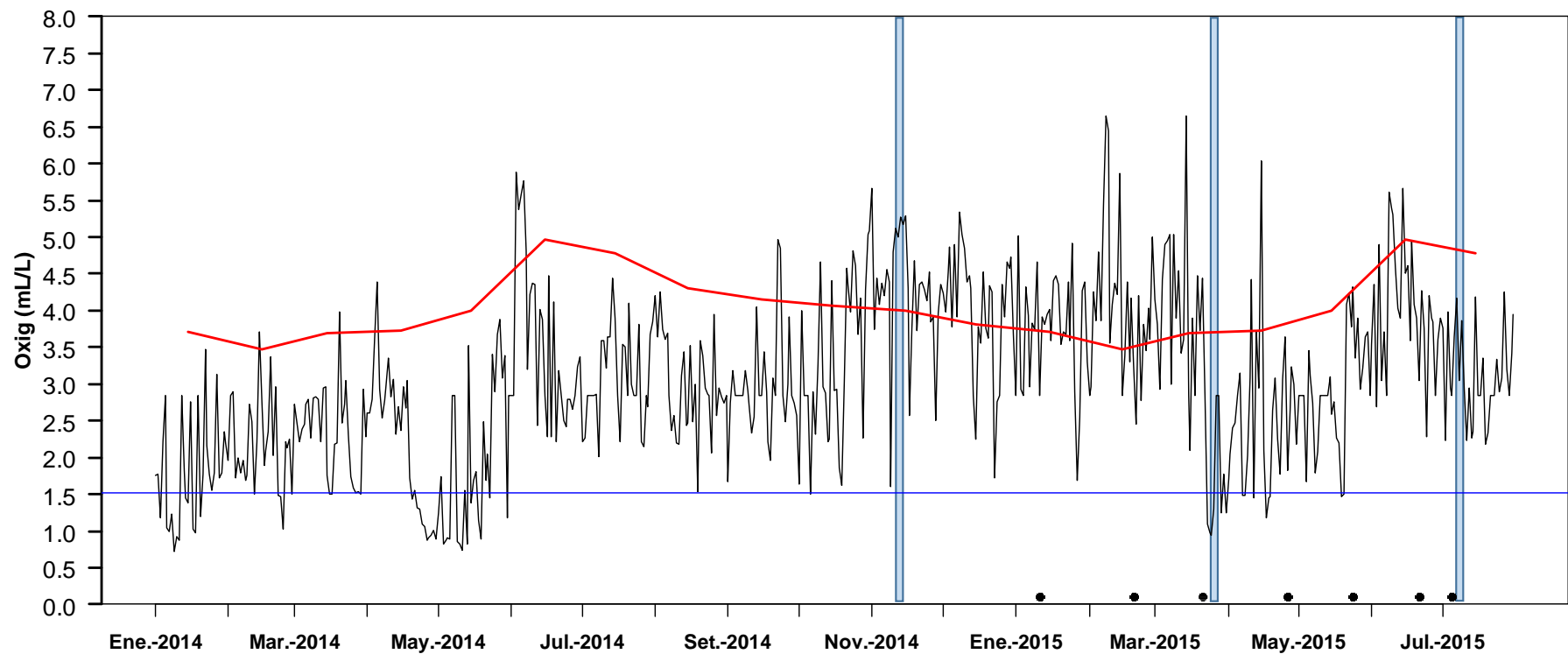


Figura 22. Serie diaria de oxígeno disuelto a 5 metros de profundidad frente a Puerto San Martín (línea negra) del programa SRT de Pluspetrol. Climatología mensual del oxígeno a 5 metros de profundidad (línea roja), basada en el periodo 2006 - 2015. La línea azul representa el valor de oxígeno del percentil 10 de la distribución de los datos. Las bandas indican el periodo de duración de las campañas de muestreo espacio-estacional y los puntos negros, los días de muestreo en el monitoreo.

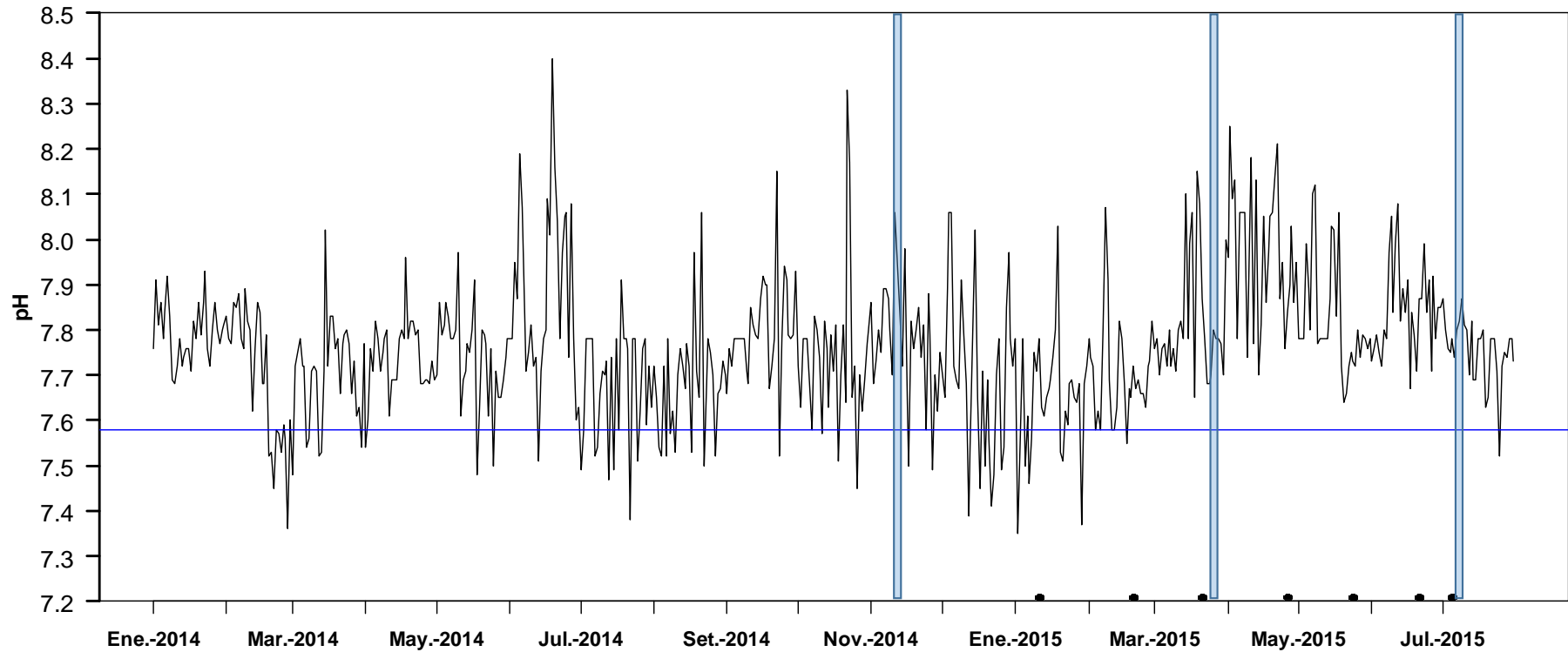


Figura 23. Serie diaria de pH a 5 metros de profundidad frente a Puerto San Martín (línea negra) del programa SRT de Pluspetrol. La línea azul representa el valor de pH del percentil 10 de la distribución de los datos. Las bandas indican el periodo de duración de las campañas de muestreo espacio-estacional y los puntos negros, los días de muestreo en el monitoreo.

4.2.2. Exposición a la hipoxia y al bajo pH frente a Puerto San Martín

Además de las series diarias de oxígeno y pH, se calculó, para cada mes, el número de días que tienen niveles de oxígeno o pH menores al 10% inferior de la distribución de los datos (percentil 10). En el caso del oxígeno, el percentil 10 corresponde a un nivel de oxígeno de 1.51 mL L^{-1} , muy cercano a la definición de la hipoxia costera (1.43 mL L^{-1}) que en los datos correspondió al percentil 7, mientras que para el pH, el percentil 10 corresponde a un nivel de pH de 7.58.

Con respecto al oxígeno, los meses con mayor número de días ($\geq 5\text{d}$) con valores menores al percentil 10 fueron enero y abril de 2014, así como marzo y abril de 2015.

Con respecto al pH, los meses con mayor número de días ($\geq 5\text{d}$) que tuvieron niveles menores al percentil 10 fueron febrero y marzo de 2014, así como diciembre de 2014, enero de 2015 y febrero de 2015.

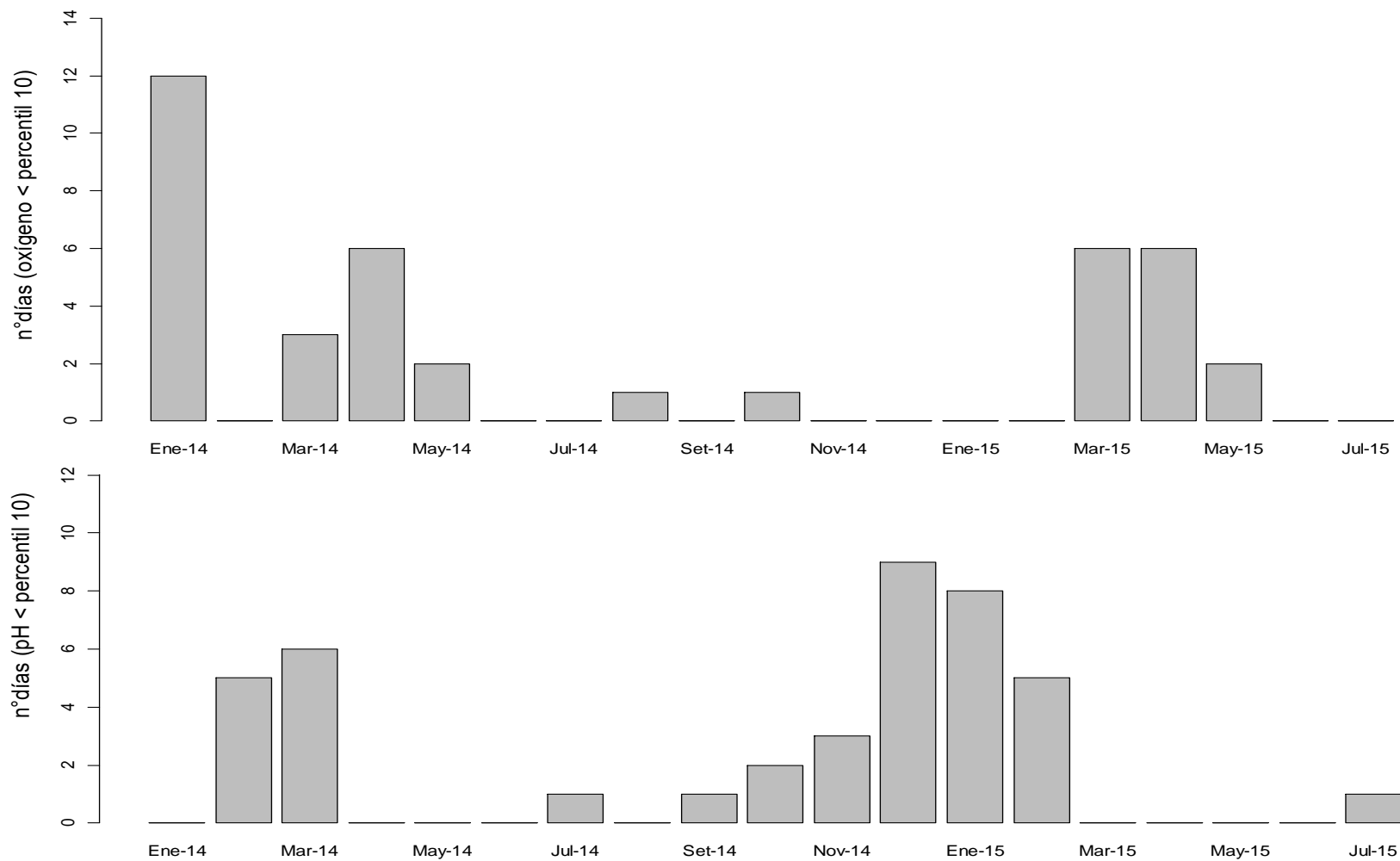


Figura 24. Número de días al mes con niveles de oxígeno (arriba) y pH (abajo) menores al percentil 10 de los datos.

4.2.3. Seguimiento de estación fija en la bahía

En esta sección se presentan los datos registrados por el sensor instalado aproximadamente a 20 cm de la superficie del sedimento en la estación 4 del estudio. Los datos que empezaron a registrarse desde el 11 de enero de 2015 hasta el 7 de julio de 2015 son de temperatura y oxígeno a frecuencia horaria. No se registraron datos entre el 21 y 29 de marzo.

4.2.3.1. Variabilidad de la temperatura

Los datos registrados por el sensor de temperatura desde el 11 de enero de 2015 hasta el 7 de julio de 2015 muestra en general una tendencia al aumento, con una temporada de alta variabilidad entre marzo y mayo (fines de verano e inicios de otoño). Los menores valores de temperatura ($<16^{\circ}\text{C}$) se registraron en los meses de enero y febrero, y los mayores ($>19^{\circ}\text{C}$) se dieron eventualmente desde marzo, pero sostenidamente entre mayo y julio (Figura 25).

4.2.3.2. Variabilidad del oxígeno disuelto

Los datos de oxígeno registrados por el sensor muestran que los niveles se encuentran la mayor parte del tiempo por debajo de la hipoxia costera (1.43 mL L^{-1}). Además, se puede observar que los máximos valores del oxígeno así como también su mayor variabilidad se dieron a partir de junio (Figura 26).

4.2.3.3. Variabilidad del pH

El pH del agua de fondo fue registrado únicamente en las salidas de campo durante el monitoreo. En la Figura 27 se puede apreciar una tendencia al aumento del pH del agua de fondo hacia los meses de mayo, junio y julio. Su mínimo valor (7.42) se registró el 21 de marzo y su máximo (8.05), el 7 de junio.

4.2.3.4. Variabilidad de la demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno tanto de superficie como de agua de fondo presentó valores bajos aunque fluctuantes, sin un patrón o tendencia definidos.

Tabla 14. Demanda bioquímica de oxígeno (5 días de incubación) de muestras de agua de la superficie y fondo de la estación de monitoreo

	DBO₅ superficie (mg/L)	DBO₅ fondo (mg/L)
12-Abr	7.92	7.1
19-Abr	4.08	3.27
26-Abr	2.61	2.61
03-May	3.42	3.26
17-May	2.36	1.39
24-May	2.28	5.3
31-May	3.1	0.33
07-Jun	0.9	-
14-Jun	5.96	5.39
21-Jun	1.3	2.28
28-Jun	4.24	5.79
05-Jul	1.96	1.47

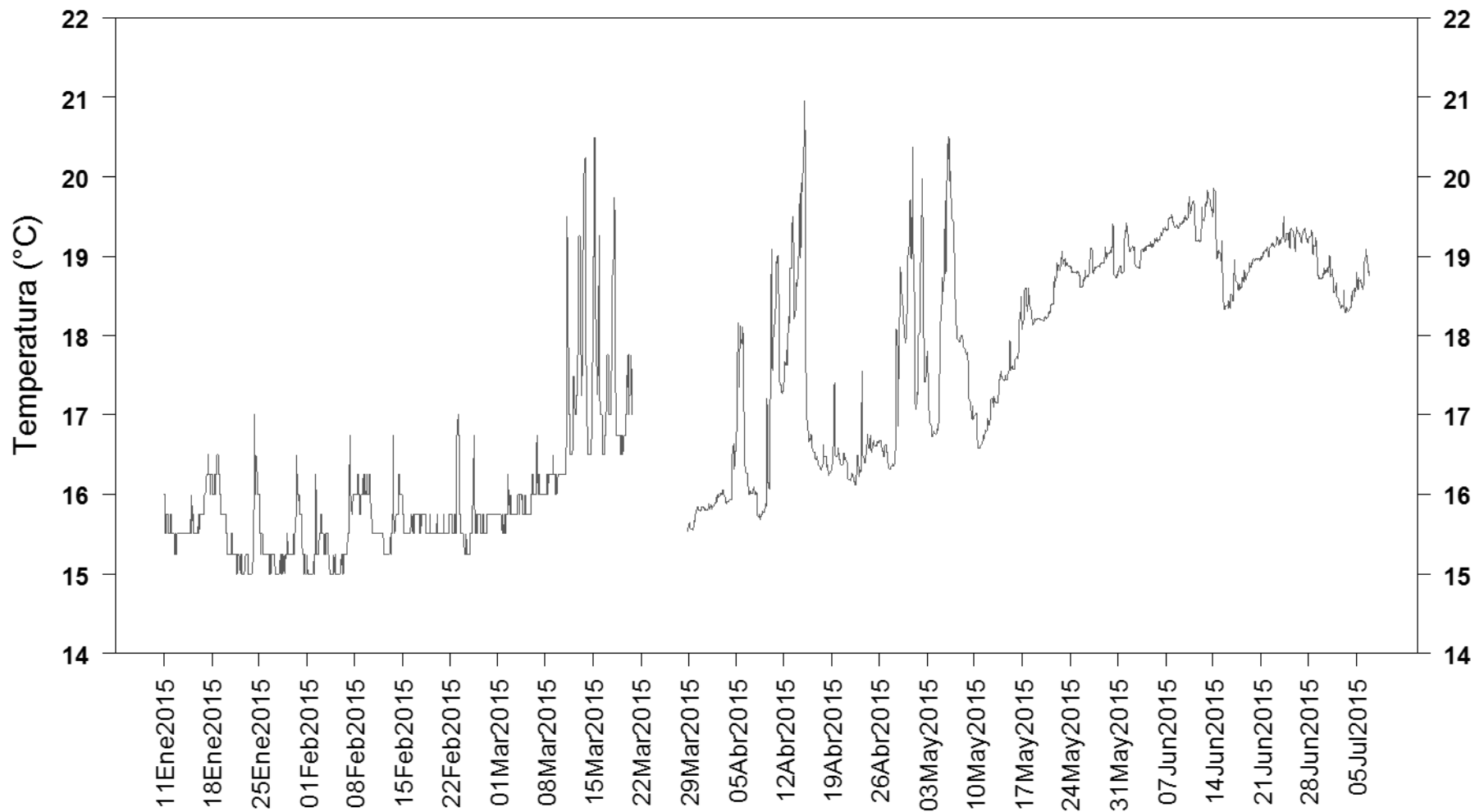


Figura 25. Serie de tiempo de temperatura de fondo a frecuencia horaria en la estación 4 del estudio en 2015.

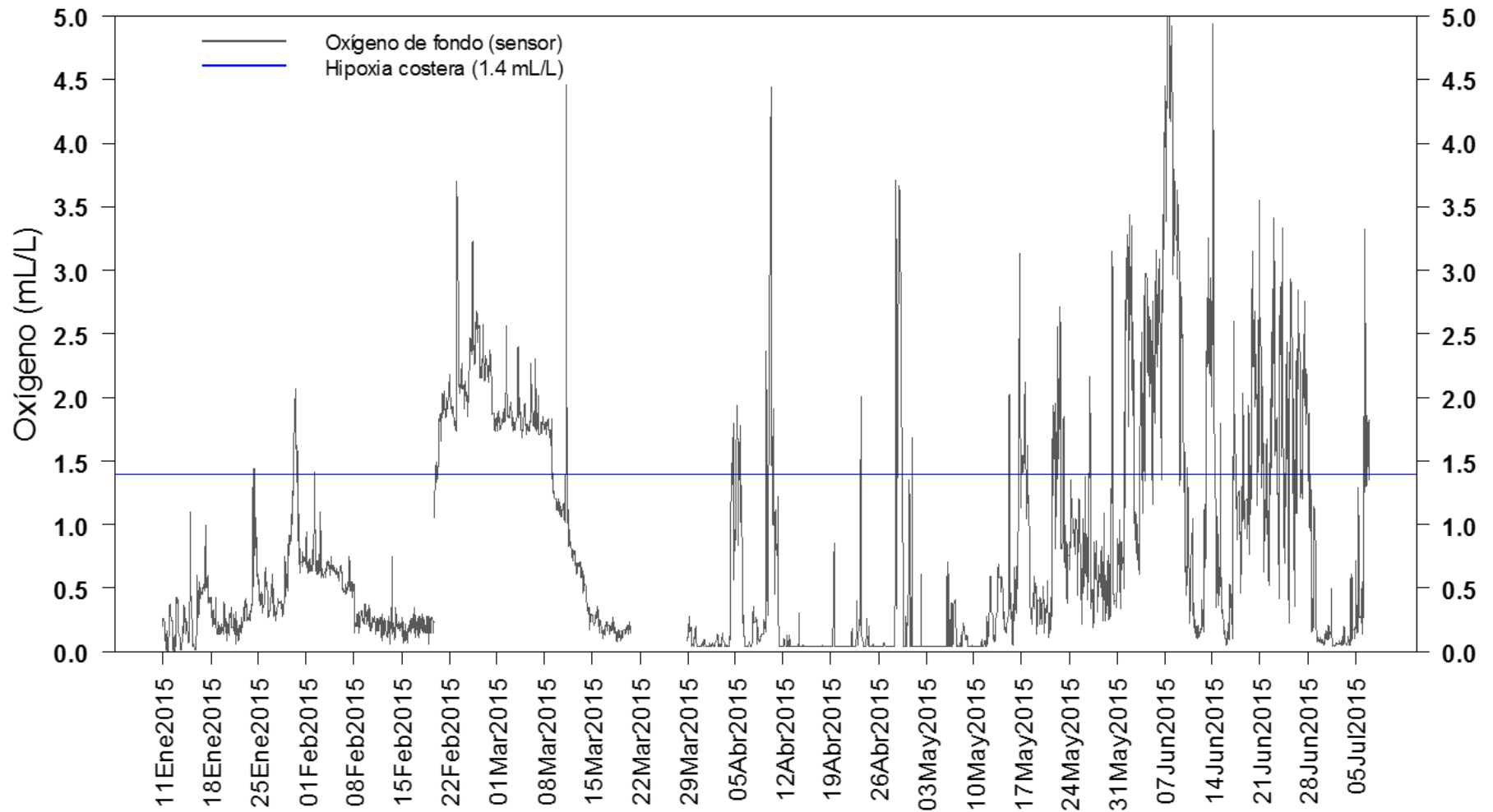


Figura 26. Serie de tiempo de oxígeno de fondo a frecuencia horaria en la estación 4 del estudio (línea gris) en 2015. Mediciones de oxígeno en muestras de agua (puntos negros). Límite superior de la hipoxia costera (línea azul)

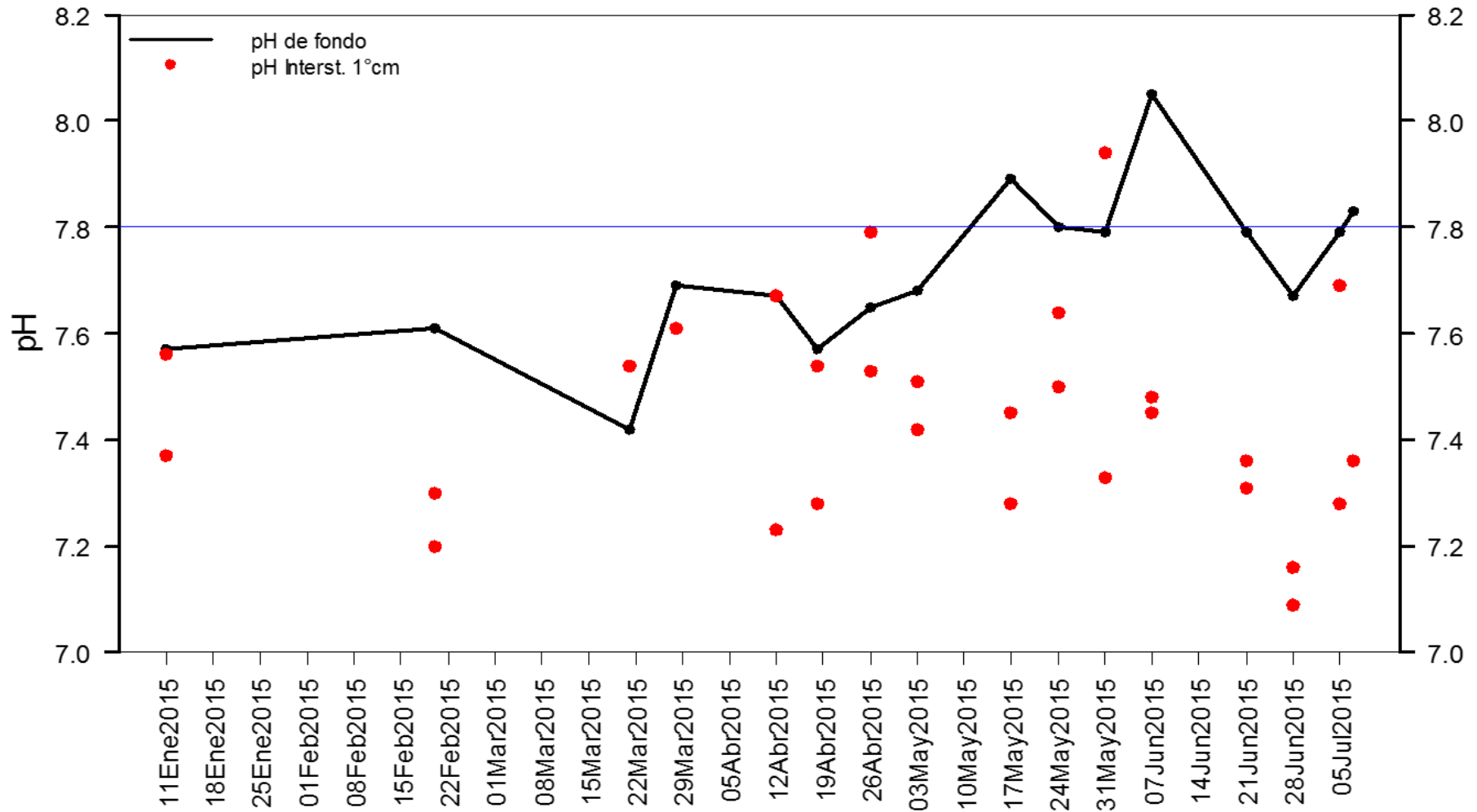


Figura 27. Valores de pH de agua de fondo y de agua intersticial del primer centímetro de sedimento. pH = 7.8 (línea azul).

4.2.3.5. Variabilidad de las propiedades geoquímicas del sedimento

La concentración de COT presentó fluctuaciones mensuales en un rango entre 18.2 y 37.9 mg/g. El valor máximo se dio en marzo y los mínimos fueron en enero (18.2 mg/g) y mayo (19.4 mg/g). El nitrógeno total presentó un rango de variación entre 3.9 y 15.0 mg/g. Su valor mínimo se dio en abril y el máximo fue en febrero. La razón C:N presentó un valor máximo (8.7) en abril y su valor mínimo (1.9) fue observado en junio.

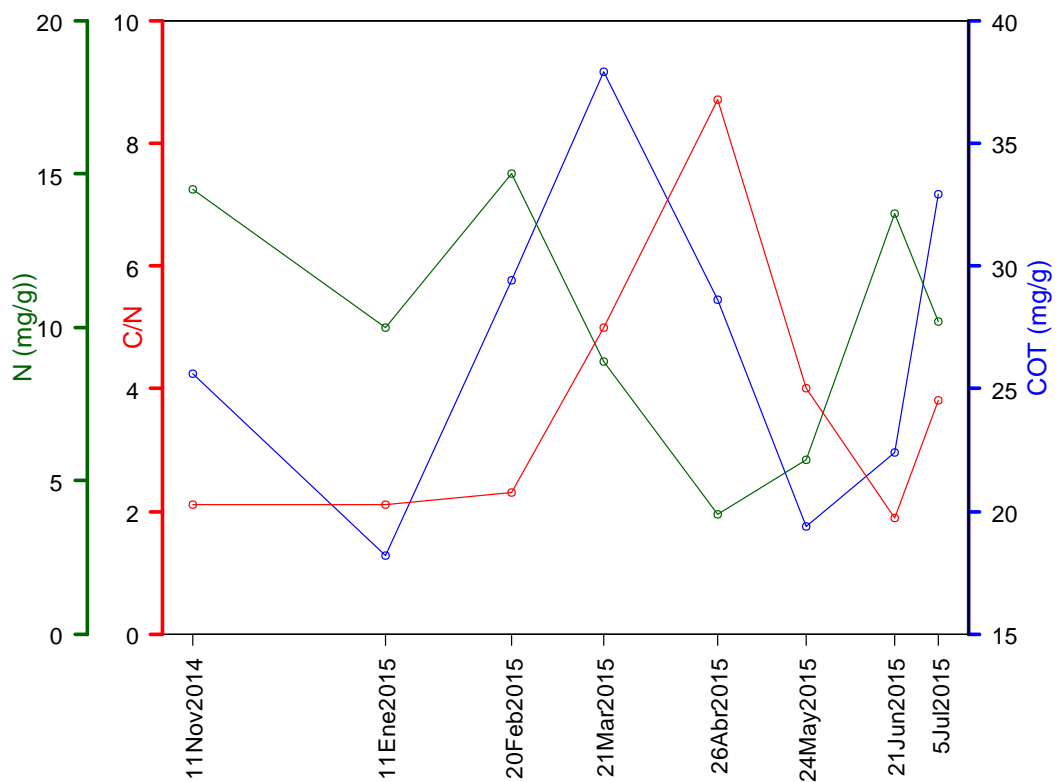


Figura 28. Contenido de carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (N) y razón carbono:nitrógeno (C:N) en el primer centímetro de sedimento

4.2.3.6. Variables del agua intersticial

Sulfuros

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el agua intersticial del primer centímetro del sedimento muestra concentraciones que van en aumento desde enero hasta marzo de 2015 con subsiguientes concentraciones bajas entre abril y junio del mismo año. Sin embargo, se encontró una concentración alta a inicios de julio que indica que no existe estacionalidad en la concentración de este compuesto reducido (Figura 29)

pH

El pH intersticial del primer centímetro de sedimento tuvo valores que se encontraron en un rango entre 7.09 y 7.94. Estos valores se encontraron por debajo del pH del agua de fondo la mayor parte del tiempo principalmente a partir de junio donde el pH intersticial (7.09 a 7.69) fue muy inferior al del agua de fondo (7.67 a 8.05) (Figura 27).

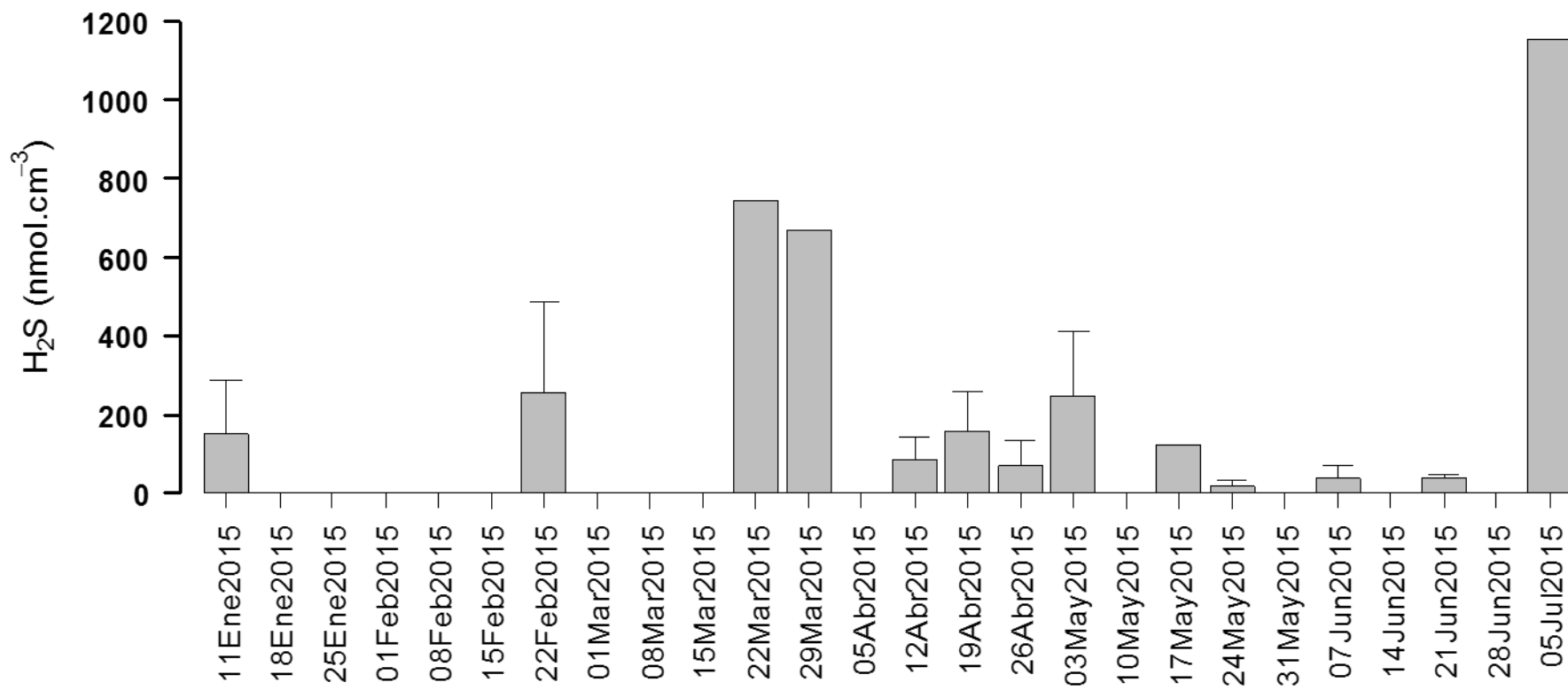


Figura 29. Concentración de sulfuro de hidrógeno en el agua intersticial del primer centímetro de sedimento en la estación de monitoreo en 2015. Los puntos son mediciones sin réplica.

4.2.3.7. Foraminíferos bentónicos

Durante el monitoreo mensual de la estación 4, la abundancia de foraminíferos bentónicos estuvo dominada por la fracción de menor tamaño y por el grupo de foraminíferos calcáreos (Figura 30). El número de especies fue muy limitado en todo el tiempo del estudio y tuvo como especies más importantes a los calcáreos *B. costata* y *B. elegantissima* y al tectináceo Allogromiidae. El aporte de las especies a las abundancias de la comunidad en cada mes del monitoreo se presenta en la Figura 33.

La abundancia de foraminíferos calcáreos mostró una tendencia creciente entre los meses de enero (696 a 1276 ind/cm³) a abril (866 a 6423 ind/cm³) y a partir de allí la abundancia se mantuvo baja (941 a 1467 ind/cm³). No se observó una tendencia en la abundancia relativa de los grupos ecológicos calcáreos, tectináceos y aglutinados. Los calcáreos fueron alrededor del 90% en casi todos los meses, mientras que en marzo alcanzaron prácticamente el 100% (Figura 32).

Al igual que en el diseño espacio-estacional, las abundancias de las especies en la fracción de mayor tamaño (Figura 30) fueron en general un orden de magnitud menor a las de la fracción de menor tamaño. La especie dominante fue *B. costata* seguida por *B. elegantissima*.

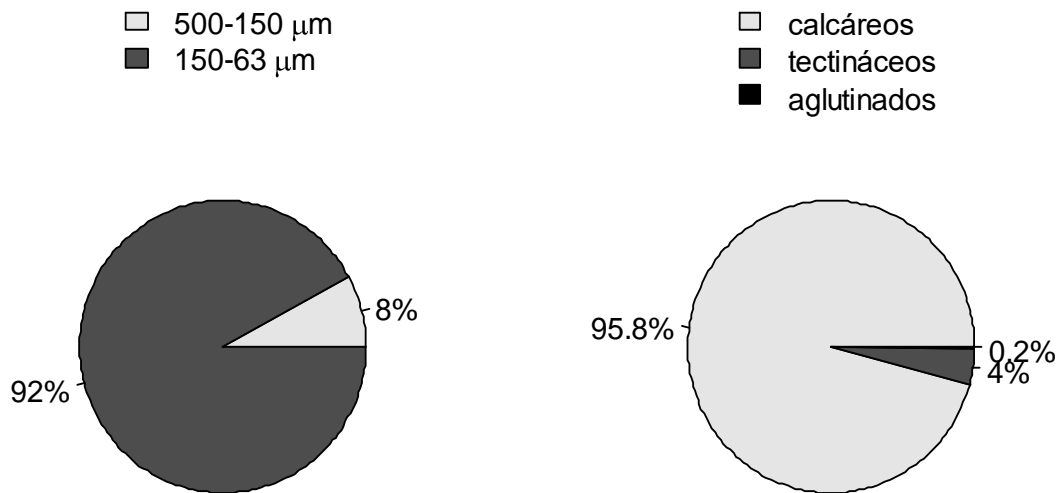


Figura 30. Representación en porcentaje de las abundancias de los foraminíferos bentónicos por fracción de tamaño (izquierda) y por grupo ecológico (derecha) de todas las muestras del monitoreo.

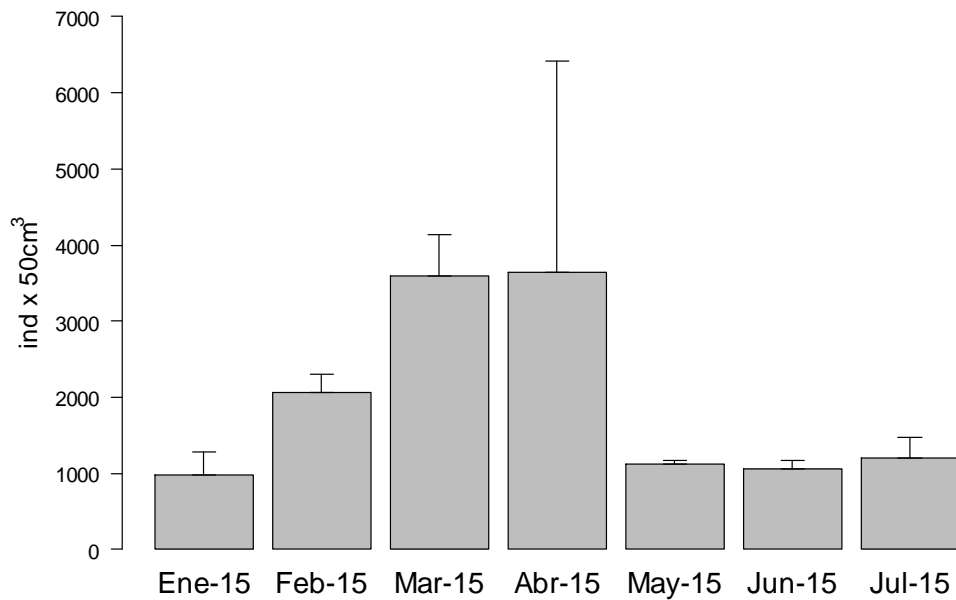


Figura 31. Abundancias de foraminíferos calcáreos de los muestreos mensuales en el punto fijo.

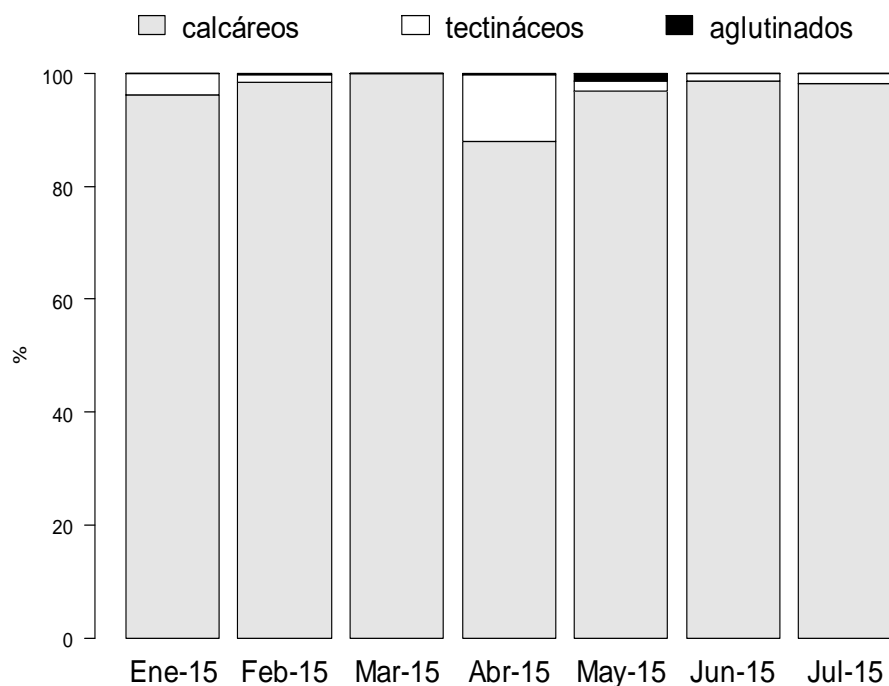


Figura 32. Abundancias relativas de los grupos ecológicos de la comunidad de foraminíferos bentónicos durante el tiempo de monitoreo.

Tabla 15. Densidad de foraminíferos (abundancias por 50cm³) por especie del monitoreo expresados como promedio (n=2) ± desviación estándar. *=especie presente en una sola réplica

	Monitoreo 2015 (E4)						
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
<i>Bolivina costata</i>	551 ± 209	957.5 ± 203	2046 ± 86	2335 ± 1758	770 ± 57	603 ± 118	842 ± 126
<i>B. elegantissima</i>	398 ± 93	1067 ± 42	1546 ± 459	873 ± 589	310 ± 10	435 ± 8	338 ± 138
<i>Nonionella auris</i>	0	0	1*	0	0	0	3*
<i>Virgulina fragilis</i>	0	0	0	0	0	8 ± 3	0
<i>Ammonia</i> sp.	0	3*	0	0	4*	0	0
Allogromiidae	37 ± 10	26 ± 6	1*	429 ± 425	20 ± 10	13 ± 8	21 ± 5
Saccaminidae	0	7 ± 2	0.0	8*	15*	0	0
N° esp. (S)	3	5	4	4	5	4	4

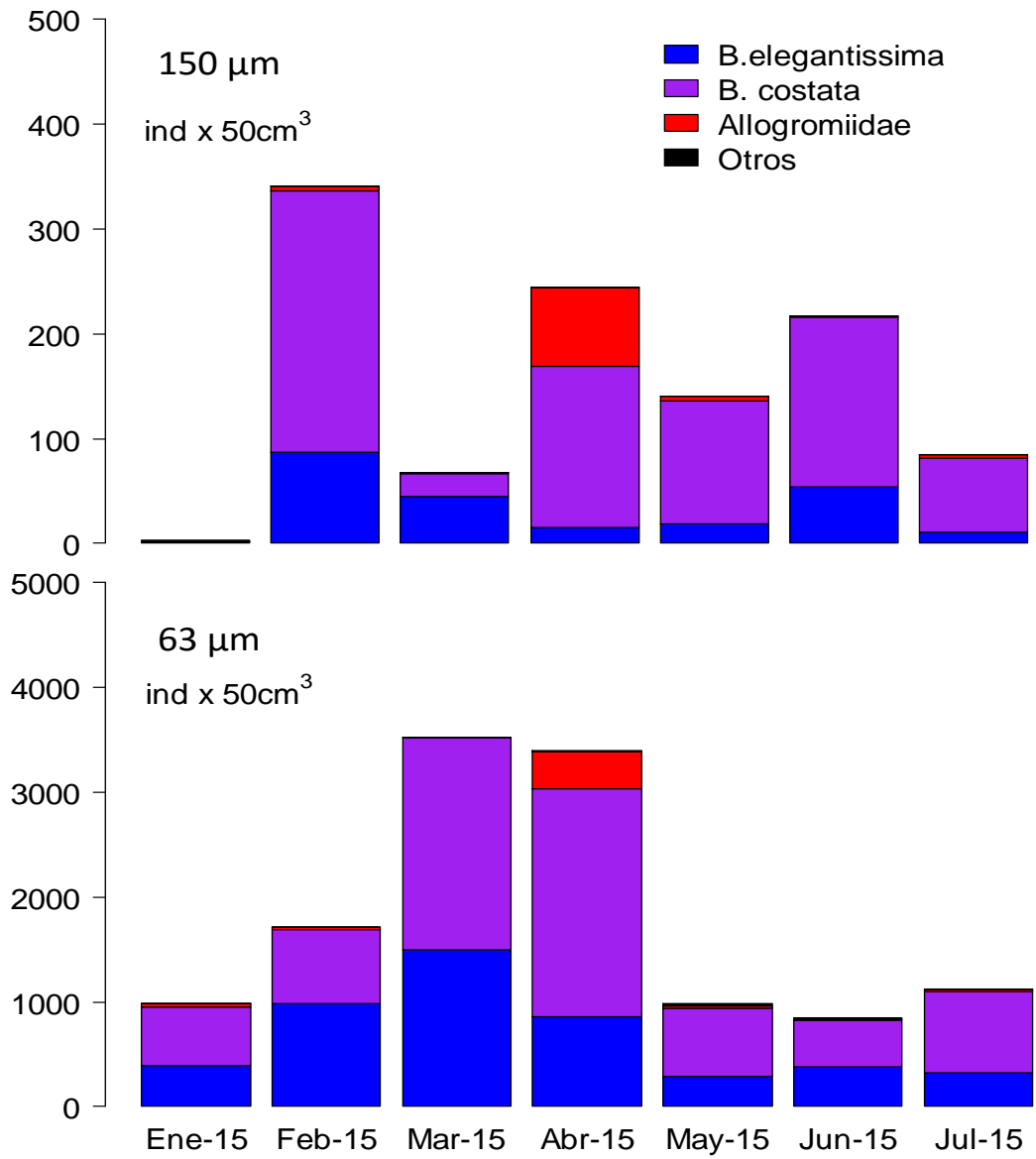


Figura 33. Abundancias por especie durante el monitoreo para la fracción de mayores tamaños (arriba) y menores tamaños (abajo)

4.3. Análisis de correlación entre las variables

Se realizó el análisis de correlación lineal de rango de Spearman (r_s) con un nivel de significancia de $p < 0.05$, corregido con el método de Bonferroni (Glantz 2002), entre todas las variables abióticas del agua de fondo y del sedimento superficial. Para lo cual, se usó todos los datos registrados en las tres campañas de muestreo del diseño espacio-estacional (tanto de las nueve estaciones de muestreo como de las estaciones adicionales de columna de agua del IMARPE) y los datos del monitoreo de la estación fija de Atenas (Estación 4). Posteriormente, también se realizó el análisis de correlación entre las variables de la comunidad de foraminíferos bentónicos y todas las variables abióticas de agua de fondo y sedimentos para niveles de significancia de $p < 0.1$ y $p < 0.05$.

Respecto a las variables del agua de fondo, el oxígeno disuelto (OD) exhibió una correlación positiva con el pH y con la temperatura. A su vez, la temperatura también exhibió correlación positiva con la salinidad. En las variables de los sedimentos, el contenido porcentual de limos exhibió una correlación negativa muy fuerte con las arcillas, mientras que el contenido de clorofila-a (Cl-a) exhibió una correlación positiva con la materia orgánica (MOT). No hubo correlación entre alguna variable de agua de fondo con alguna del sedimento superficial (Tabla 16).

En el análisis de correlación entre las variables abióticas y las de la comunidad de foraminíferos bentónicos se observó que el oxígeno del agua de fondo se correlacionó positivamente con la riqueza de especies de toda la comunidad y negativamente con la proporción de foraminíferos calcáreos robustos. El pH del agua de fondo solo exhibió una correlación negativa con el número de testas vacías.

El pH del agua intersticial exhibió correlación positiva con la abundancia de los foraminíferos bentónicos de toda la comunidad así como solo del grupo calcáreo. La clorofila-a y la MOT se correlacionaron negativamente con la riqueza total y la riqueza de especies calcáreas, y positivamente con la proporción de foraminíferos calcáreos robustos. La clorofila-a también se correlacionó negativamente con la proporción de testas vacías. A su vez, el contenido de arcillas se correlacionó positivamente con la proporción de calcáreos robustos, mientras que los limos negativamente (Tabla 17).

Tabla 16. Análisis de correlaciones de rango de Spearman entre los datos de las variables abióticas de todo el estudio, aplicándose la corrección de Bonferroni de comparaciones múltiples. Se presentan los coeficientes de las correlaciones significativas ($p < 0.05$) y el número de datos empleados (n) en la correlación. T: temperatura. Sal: salinidad. Oxi: oxígeno disuelto. Chl-a: clorofila-a. MOT: materia orgánica total. pH int.: pH intersticial.

	Agua de fondo				Sedimentos					
	T	Sal	Oxi	pH	Arcilla	Limo	MOT	Chl-a	pH int.	H ₂ S
T		n=63	n=64							
Sal	0.48									
Oxi	0.59	n.s.		n=64						
pH	n.s.	n.s.	0.79							
Arcilla	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		n=27				
Limo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.95					
MOT	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		n=31		
Cl-a	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.66			
pH int.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
H ₂ S	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

Tabla 17. Análisis de correlaciones de rango de Spearman entre las variables abióticas y las variables de la comunidad de foraminíferos bentónicos, aplicándose la corrección de Bonferroni de comparaciones múltiples. Se presentan los coeficientes de correlación significativos ($p < 0.1$, $*p < 0.05$) y entre paréntesis el número de datos empleados en la correlación. S: riqueza de especies. N: abundancia (ind/50cm³ de sedimento superficial). Calc.: calcáreos. Chl-a: clorofila-a. MOT: materia orgánica total. pH int.: pH intersticial.

	Agua de fondo		Sedimento superficial				
	Oxígeno	pH	pH int.	Chl-a	MOT	Arcilla	Limo
S total	0.30 (n=32)	n.s.	n.s.	-0.41* (n=26)	-0.64* (n=27)	n.s.	n.s.
S calc.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.32 (n=26)	-0.48* (n=27)	n.s.	n.s.
N total	n.s.	n.s.	0.46 (n=17)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
N calc.	n.s.	n.s.	0.42 (n=17)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
No calc.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Proporción calcáreos robustos	-0.32 (n=32)	n.s.	n.s.	0.59* (n=26)	0.79* (n=27)	0.43* (n=27)	-0.48* (n=27)
Testas calcáreas vacías	n.s.	-0.35* (n=32)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Proporción testas vacías	n.s.	n.s.	n.s.	-0.39* (n=26)	n.s.	n.s.	n.s.

5. DISCUSIÓN

5.1. Ecología y distribución de los foraminíferos bentónicos en ambientes someros eutróficos

5.1.1. Parámetros comunitarios y composición de los foraminíferos bentónicos

La densidad promedio de los foraminíferos en el centímetro superficial de los sedimentos en la bahía de Paracas tuvo un rango (361 a 7344 ind./50cm³) comparable a otros ambientes sublitorales someros (hasta 1115 ind./50cm³, Haynert et al. (2012)) y litorales (hasta 4200 ind./50cm³, Armynot du Châtelet et al. (2009)). La diversidad (riqueza) de especies encontrada fue similar a la de ambientes someros que se encuentran bajo condiciones de fuerte estrés ambiental de origen natural y/o antrópico (Bandy et al. 1964; Eichler et al. 2012; Haynert et al. 2012), pero menor a la de ambientes que no presentan tales condiciones (Sen-Gupta & Kilbourne 1974; Diz et al. 2000; Serandrei-Barbero et al. 2003) (Tabla 18).

En ambientes someros típicamente oligotróficos y de condiciones oxigenadas en el fondo y los sedimentos como la cuenca de Levantine en el sur este del mar Mediterráneo, la comunidad de foraminíferos en la superficie del sedimento es diversa y tiene mayor participación de las especies aglutinadas y calcáreasaporcelanadas (Hyams-kaphzan et al. 2009). Lo mismo ocurre en ambientes someros que no presentan fluctuaciones ambientales marcadas (Serandrei-Barbero et al. 2003). En cambio, el marcado predominio del grupo calcáreo hialino y la pobre participación de las especies calcáreasaporcelanadas y aglutinadas en la comunidad de ambientes someros es un indicador de hipoxia severa y estrés

ambiental por contaminación orgánica (Bandy et al. 1964; Platon et al. 2005; Toefy & Gibbons 2014). Además, es conocido que muchas especies calcáreas hialinas de los órdenes Rotaliida y Buliminida son típicas de las comunidades de ambientes pobres en oxígeno (Sen Gupta & Machain-Castillo 1993; Bernhard & Sen Gupta 1999). Este patrón de dominio de formas calcáreas hialinas se observa repetidamente en ambientes marinos someros que presentan condiciones hipóxicas inducidas por la eutrofización (natural o antropogénica) y estratificación estacional. Tal es el caso de ambientes someros como Flensburg Fjord en la zona sur oeste del mar Báltico y Long Island Sound en las costas atlánticas de EEUU (Akpati 1975; Haynert et al. 2012) (Tabla 18).

5.1.2. Distribución y asociación de las especies calcáreas en los sedimentos someros

Las especies calcáreas encontradas en este trabajo (*Bolivina costata*, *Buliminella elegantissima*, *Discorbis* sp., *Nonionella auris*, *Virgulinea fragilis*, *Bulimina* sp. y *Ammonia* sp.) han sido reportadas anteriormente en los sedimentos de la costa peruana (Verano 1974; Mayor 1993; Cardich 2012). Las especies *Bolivina costata*, *Buliminella elegantissima* y *Discorbis* sp., fueron reportadas por Verano (1974) en el litoral de Lima, principalmente en playas arenosas, y *B. costata* fue la especie que tuvo mayor frecuencia de aparición. En los sedimentos de la plataforma centro-norte, Mayor (1993) encontró que *B. costata* se distribuyó en un amplio rango batimétrico, entre 21 y 500 m, mientras que *B. elegantissima* lo hizo entre 0 y 200 m. Sin embargo, ambas especies no fueron las más importantes en términos de

abundancia, salvo en sus estaciones de muestreo más someras (20 a 50 m), frente a Pimentel (~7° S), donde estas dos especies fueron las más dominantes. Mayor (1993) también encontró que la menor diversidad de especies se dio repetidamente en las estaciones más someras de su estudio. En perfiles batimétricos en la plataforma frente a Callao y Pisco, Cardich et al. (2012, 2015) encontraron dos comunidades en base a diferencias en las condiciones de óxido reducción del hábitat bentónico. Según sus resultados, la primera comunidad está compuesta principalmente por *B. costata*, *Nonionella auris* y *Virgulinema fragilis*, y es característica de los sedimentos anóxicos (sulfurosos), ricos en alimento fresco, típicos de la plataforma interna (profundidad menor a 94 metros). La segunda comunidad estuvo compuesta principalmente por *Bolivina seminuda*, *Bulimniella tenuata* y *Bolivina pacifica*, y esta última fue característica de los sedimentos post-óxicos (cero oxígeno sin presencia de sulfuros), con alta preservación de materia orgánica debido a la deficiencia permanente de oxígeno sobre el fondo, típicos de mayores profundidades. También observaron que la comunidad menos diversa fue la de la plataforma interna y *B. elegantissima* estuvo presente en ambas comunidades pero con abundancias relativas menores al 10%. En el presente trabajo, la diversidad (riqueza) de foraminíferos bentónicos fue mucho menor en comparación con los otros estudios realizados en las zonas someras en Perú. Además, *B. elegantissima* es reportada por primera vez como la especie más dominante en este tipo de ambientes.

En bahía Mejillones, Chile, la cual es una zona influenciada por las surgencias costeras y condiciones de hipoxia severa (Marín et al. 1993), Páez et al. (2001) asoció la distribución de las especies de foraminíferos a las condiciones en la

oxigenación en el fondo. Encontró que *B. elegantissima* estuvo muy asociada a los sedimentos más costeros (~50 m) y a niveles hipóxicos (~0.5 mL L⁻¹), mientras que su contraparte, *Bolivina seminuda*, fue claramente dominante en los sedimentos profundos sujetos a condiciones de microxia (menor a 0.1 mL L⁻¹). *B. costata* y *N. stella* (posiblemente *N. auris*) se distribuyeron indistintamente en hábitats hipóxicos y micróxicos.

Las principales especies de la comunidad de foraminíferos bentónicos de la plataforma interna reportadas por Cardich et al. (2012, 2015) (*B. costata*, *N. auris* y *V. fragilis*) también se presentaron asociadas en este estudio (Figura 16). Debido a que los estudios de Cardich et al. (2015) y Páez et al. (2001) fueron realizados en perfiles batimétricos donde las estaciones más someras estuvieron a más de 40 metros de profundidad, no fue posible observar si las asociaciones que encontraron mantienen su identidad en ambientes someros con grandes fluctuaciones ambientales. En este estudio, reportamos que la especie *B. elegantissima* también está asociada a estas especies y más fuertemente a *B. costata* (Figura 16 y Figura 17) con la que conforma casi el 90% de la abundancia al interior de la bahía (Zona B). En cambio, *N. auris* y *V. fragilis* presentan una mayor abundancia relativa fuera de la bahía del mismo modo que *Ammonia* sp. y *Discorbis* sp. (Tabla 7).

Según (Murray 2013), las especies de foraminíferos bentónicos generalistas se caracterizan por su tolerancia a amplios rangos de condiciones ambientales y porque su capacidad de respuesta a los cambios ambientales es menor. En relación a ello, *B. costata* y *B. elegantissima* en la Bahía de Paracas parecen ser las especies que toleran mejor las condiciones cambiantes del medio ya que son abundantes en todas las estaciones y temporadas de muestreo. *B. costata* ha sido reportada como

una especie muy común en una gran variedad de ambientes, desde el intermareal arenoso hasta profundidades batiales y desde el norte de Chile hasta el sur de Ecuador (Verano 1974; Mallon 2011; Cardich et al. 2015), mientras que *B. elegantissima*, fue reportada desde el intermareal arenoso hasta profundidades de quiebre de plataforma (Verano 1974; Mallon 2011). Sin embargo, *B. elegantissima* es también considerada una especie cosmopolita porque se la ha reportado en muchos ambientes costeros como estuarios, lagunas marinas y ambientes de plataforma en los océanos Pacífico, Atlántico y Mediterráneo (Boltovskoy y Wright 1976; Murray 2006). Es también una especie muy común en zonas costeras polucionadas (Bandy et al. 1964; Stott et al. 1996; Donnici et al. 2015). Por otro lado, las abundancias de estas dos especies fueron mayores en marzo y abril de 2015 en el muestreo mensual de la estación fija (Figura 33), probablemente como respuesta a la mayor sedimentación de materia orgánica en esos meses. Es posible que *B. costata* y *B. elegantissima* tengan tanto un amplio rango de tolerancia a los factores ambientales como una respuesta clara a grandes flujos de materia orgánica hacia los sedimentos.

Tabla 18. Lista de la riqueza total de especies (S) y la participación relativa de los grupos ecológicos en comunidades de foraminíferos reportados en diferentes ambientes someros. * = No especificado.

Zona	Condición ambiental	Prof.	Riqueza (S)	Participación relativa de grupos ecológicos			Autor
				Calcáreos hialinos	Aglutinados	Calcáreos aporcelanados	
Golfo de Venecia	No estrés	< 20m	64	Dominantes	Escasos	Abundantes	Serandrei-Barbero et al. 2003
Ría de Vigo	No estrés	≤ 40m	21 - 49	Dominantes	Abundantes	Ausentes	Diz et al 2000
Palmahim coast	No estrés	≤ 40m	71 a 101	Dominantes	Abundantes	Abundantes	Hyams-Kaphzan et al 2009
Georgia Shelf	No estrés	≤ 40m	20-60	*	*	*	Sen Gupta & Kilbourne 1974
Whites Point	Contaminación orgánica	≤ 50m	5 a 10	Dominantes	Escasos	Escasos	Bandy et al 1964
Mar Grosso	Contaminación orgánica	< 20m	9	Dominantes	Ausentes	Escasos	Eichler et al 2012
Bahía Santa Helena	Contaminación orgánica	< 10m	8 a 15	Dominantes	Escasos	Escasos	Toefy & Gibbons 2014
Flensburg Fjord	Hipoxia-anoxia estacional	< 25m	8	Dominantes	Escasos	Ausentes	Haynert et al 2012
Long Island Sound	Anoxia estacional	≤ 30m	*	Dominantes	Escasos	Escasos	Thomas 2000
Bahía Paracas	Hipoxia-anoxia estacional	≤ 10m	11	Dominantes	Escasos	Ausentes	Este estudio

5.2. Dinámica física, hipoxia y bajo pH en la bahía de Paracas

5.2.1. Surgencias costeras y temperatura en la bahía de Paracas

De toda la costa peruana, la zona de Pisco presenta los vientos paralelos a la costa más intensos y persistentes (Goubanova et al. 2010) y por consiguiente las surgencias costeras se dan todo el año y con mayor intensidad en invierno y primavera (Gutiérrez et al. 2011). Es de esperar, entonces, que las aguas que bañan las costas de Pisco, incluyendo a la bahía de Paracas, tengan valores de temperatura y salinidad característicos de las surgencias (de 14°C a 17°C y de 34.85 a 35.00, respectivamente) (Sears 1954; Morón 2000) con una señal estacional que refuerza estas características en el invierno. Sin embargo, en el verano, las aguas superficiales pueden presentar una estratificación térmica que permite el desarrollo de grandes floraciones algales y los valores más altos de productividad primaria y clorofila-a (Gutiérrez et al. 2011). A una escala más fina, en la bahía de Paracas Aguirre-Velarde et al. (2014, 2016) observaron una gran variabilidad de la temperatura de la columna de agua desde fines de primavera hasta fines de verano, con grandes cambios incluso en cuestión de horas, presuntamente relacionada a la variación de alta frecuencia en la intensidad de los vientos. Estos cambios darían origen a condiciones estratificadas más frecuentes en la bahía en verano, como se pudo observar en los resultados de este estudio. Es así que los eventos de mayor diferencia entre la temperatura de fondo y superficie son más frecuentes en los meses de verano (Figura 21).

5.2.2. Dinámica temporal de la hipoxia costera y la anoxia en la bahía de Paracas

En el monitoreo que realizaron Kahru et al. (2004), del desarrollo de una floración algal en la bahía de Paracas, encontraron que este fenómeno está asociado a eventos de hipoxia y anoxia que resultan de la respiración del material orgánico acumulado. Aunque la hipoxia generalizada en la columna de agua es episódica (Cabello et al. 2002; Kahru et al. 2004), puede ser persistente en el agua muy cercana al sedimento (suprayacente). Aguirre-Velarde et al. (2016) encontraron que a 20 cm del sedimento, en una estación al interior de la bahía de Paracas, el agua fue hipóxica (definido como saturación de oxígeno menor a 24%) el 70% del tiempo entre enero y marzo de 2013. En el presente estudio se encontró que en 2015, el OD medido en Puerto San Martín se encuentra en un rango mayor que el registrado por el sensor en el punto fijo de monitoreo. El primero, medido a una profundidad media en la columna de agua (a 5 m de la superficie y aproximadamente a 3 m sobre el fondo), presentó niveles que casi todo el tiempo estuvieron por encima de la definición de hipoxia costera (1.43 mL L^{-1} , Rabalais et al. (2010)), valor muy cercano al percentil 10 de los datos (1.51 mL L^{-1}), salvo en algunos días entre marzo y abril (Figura 22). Por otro lado, el OD registrado en la estación fija del estudio, a solo 20 cm del sedimento (Figura 26), revela que el OD estuvo por debajo del nivel de hipoxia costera el 82% del tiempo entre enero y julio, aunque a partir de mayo hubo grandes fluctuaciones del OD desde niveles casi anóxicos hasta aproximadamente 5 mL L^{-1} . La diferencia entre el OD registrado a una profundidad media en Puerto San Martín y el registrado sobre el fondo en el punto fijo, indica la importancia de los procesos de oxidación que ocurren en el sedimento que consumen oxígeno del agua suprayacente. Middelburg & Levin (2009) señalaron que los sedimentos costeros

con alta carga orgánica tendrían una gran demanda de oxígeno para la remineralización aeróbica de la MO, pero principalmente para la re-oxidación de los compuestos reducidos generados por la respiración anaeróbica, el cual sería el proceso dominante en este tipo de ambientes. De hecho, afirman que la mayor parte del consumo de oxígeno en los sedimentos costeros se debe a los procesos de re-oxidación de los compuestos reducidos.

Históricamente hablando, los episodios de anoxia en la zona de estudio han sido reportados en diferentes momentos del año como resultado de la sinergia de procesos naturales y antropogénicos (Guzmán et al. 1997; Sánchez et al. 1997; Cabello et al. 2002) debido a la presencia de plantas procesadoras de harina de pescado que vertían directamente sus aguas residuales a la bahía. Sin embargo, desde el año 2005, un emisor submarino de 13.8 km de largo traslada el vertido de estos desechos al noroeste de la bahía y a una profundidad de 50 metros en una zona que permite su dispersión (APROPISCO 2012). Pese a esto, se siguen registrando episodios de anoxia que tendrían origen en procesos naturales, dándose principalmente en el verano e inicios de otoño y suelen ser acompañados por el fenómeno de decoloración del agua, comúnmente conocido como “aguas blancas” o “aguas lechosas” (Aguirre-Velarde et al. 2014). Esta decoloración también fue reportada por Schunck et al. (2013) en Paracas y Callao, y fue descrita como la formación de azufre (S^0) coloidal, producto de la oxidación del H_2S en la columna de agua. Durante este estudio se registró anoxia en la bahía entre el 26 y 29 de marzo principalmente en el lado este del área de estudio (Figura 7) y estuvo acompañada del fenómeno de “aguas blancas” en la bahía (Anexo A15). Sin embargo, la anoxia fue reportada desde el 18 de marzo por el Laboratorio Costero

de Pisco del IMARPE y tuvo como consecuencia una gran mortalidad de organismos bentónicos y pelágicos en toda la bahía (IMARPE 2015).

5.2.3. Dinámica del pH en el agua de fondo y en los sedimentos

Las surgencias costeras también establecen condiciones base para los niveles de pH en la bahía de Paracas ya que estas llevan aguas con niveles característicamente bajos de pH y altos de CO₂ disuelto (Copin-Montégut & Raimbault 1994; León et al. 2011). Los datos de Puerto San Martín (Figura 23) muestran que el pH en la columna de agua fluctúa entre 7.35 y 8.40, con un promedio de 7.77 y una mediana de 7.76 (50% de los datos estuvieron por debajo de 7.76). Estos niveles de pH en la Bahía de Paracas pueden ser menores a los de otros ambientes someros. Por ejemplo, los datos de alta frecuencia de pH registrados por Booth et al. (2012) en la bahía de Monterrey, EEUU, la cual está influenciada por surgencias costeras estacionales, revelaron que su rango de variabilidad está entre 7.70 y 8.10. Mientras que en los bosques de macroalgas en La Jolla, California, solo el 25% de los datos de alta frecuencia de pH estuvieron por debajo de 7.8 (Frieder et al. 2012).

El rango de variación y las tendencias observadas del pH de la columna de agua en Puerto San Martín, estarían asociados a procesos locales como floraciones algales cuyas fotosíntesis disminuye las concentraciones de CO₂ disuelto (Friederich et al. 2008) y aumenta el pH; así como la respiración aeróbica de la materia orgánica la cual está ligada a la disminución del pH por el aumento del CO₂ disuelto (Burnett 1997; Burnett y Stickle 2001). Debido a que los valores de pH en Puerto San Martín fueron medidos a una profundidad media (5 metros) de una columna de

aproximadamente 8 metros, es posible que en los meses de verano el pH haya sido más influenciado por las floraciones algales recurrentes en ese periodo y por ese motivo hubo una tendencia al aumento del pH en esos meses (Figura 23). El agua de fondo en la bahía puede tener valores de pH aún menores y menos variables que la superficie y la profundidad media, debido a que en el fondo la respiración aeróbica sería el principal proceso que afecta al pH. La diferencia entre el pH del agua de fondo y de la superficie se hace notable en los eventos de estratificación en el verano en la bahía como ocurrió el 21 de marzo del 2015. En esta fecha, se observó una fuerte estratificación térmica con cambios drásticos en el pH en la columna de agua (Figura 34). La relación entre el consumo de oxígeno y la disminución del pH pudo observarse en la correlación positiva que presentaron el pH y el oxígeno disuelto del agua de fondo en el tiempo de estudio (Tabla 16).

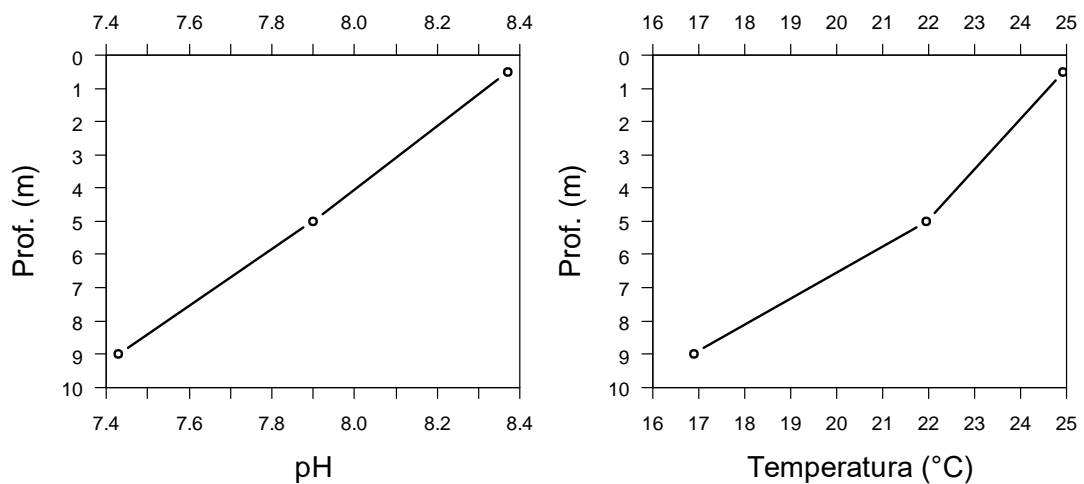


Figura 34. Perfil de pH y temperatura en la columna de agua de la estación fija de monitoreo, el 21 de marzo de 2015. Medición hecha en superficie (0m), media agua (5m) y fondo (9m).

En relación a la primera hipótesis de este trabajo, tanto el patrón temporal del pH de fondo observado en el diseño espacio estacional (anexo A4), como la tendencia del mismo en el monitoreo de la estación fija (Figura 27) y en el tiempo de exposición (Figura 24), confirman que el pH de fondo varía estacionalmente en la bahía, presentando sus menores valores en los meses de verano. La asociación de este patrón con la mayor sedimentación orgánica y la mayor respiración, se aprecia al menos parcialmente en la Figura 28, que muestra que el carbono orgánico alcanzó un valor máximo en marzo lo cual es consistente con condiciones de mayor flujo orgánico. Los valores bajos de la razón C:N (menores a la relación de Redfield: 6.6) en el sedimento antes y después del pico de abril, revelan la colonización bacteriana de la materia orgánica (Ruttenberg & Goñi 1997), mientras que la disminución del nitrógeno orgánico desde marzo hasta mayo y el incremento de la razón C:N en los mismos meses sugieren una mayor respiración bacteriana sobre la materia orgánica ya que durante la descomposición del material fitodetrítico, que es alto en nitrógeno, se pierde nitrógeno como flujo de salida del complejo detrito-microbiano y, por consiguiente, la razón C:N aumenta (Thornton & McManus 1994).

No obstante, el pH del agua intersticial del centímetro superficial del sedimento no tiene el mismo comportamiento temporal que el pH del agua de fondo. De hecho, en el monitoreo de la estación 4 (Atenas), entre marzo y abril el pH intersticial tuvo niveles cercanos al pH de fondo, mientras que entre junio y julio, el pH intersticial fue mucho más bajo en contraste a los mayores niveles del pH de fondo (Figura 9 y Figura 27). Debido a que no fue posible obtener datos de pH intersticial en la campaña de noviembre de 2014, no se puede asegurar que las condiciones hayan sido más ácidas en ese mes. Sin embargo, la actividad de los sedimentos y su

expresión en el agua de fondo puede darnos una pista de las condiciones prevalecientes en los sedimentos en noviembre.

De acuerdo a los datos de nutrientes en agua de fondo, generados por el IMARPE, para las mismas campañas de trabajo de campo de este estudio, las concentraciones de fosfatos se presentaron en un rango (0.76 a 5.05 μM), el cual fue más elevado que el rango general del sistema de surgencias frente a Perú (0.25 a 2.5 μM ; Graco et al. 2007). Estas concentraciones fueron notoriamente mayores en marzo de 2015 y estarían respondiendo a la removilización del fósforo en los sedimentos asociada a una actividad anaeróbica más intensa que en noviembre y julio, donde los fosfatos fueron menores y más típicos de condiciones oxigenadas (Figura 35). Esto debido a que la respiración anaeróbica de la materia orgánica en los sedimentos costeros genera fósforo soluble (fosfatos) que es liberado por el sistema bentónico hacia el agua suprayacente y de fondo (Klump & Martens 1981). Los nitratos en el agua de fondo exhibieron concentraciones (0 a 18.6 μM) similares a lo normalmente reportado en la capa superficial del sistema de surgencias frente a Perú (0 a 20 μM , Graco et al. 2007). Las concentraciones fueron muy bajas en noviembre y marzo, ya que estarían siendo agotados por su uso en la desnitrificación que puede darse parcialmente en este tipo de ambientes costeros (Graco et al. 2001). Este mismo patrón estacional se evidencia en el rango y en la distribución de la razón N:P (Figura 37). Adicionalmente, la mayor oxigenación sobre el sedimento en noviembre de 2014 e incluso mayor en julio de 2015 (Figura 7), sugieren que entre julio y noviembre (inicios de invierno y fines de primavera) se estaría dando la coexistencia de la respiración aeróbica y anaeróbica de la MO en el sedimento, así como la oxidación aeróbica de compuestos reducidos como los sulfuros (H_2S), ya

que se encontró la presencia de H_2S en el agua intersticial del sedimento superficial en todas las campañas de muestreo. La prolongada interacción de las condiciones aeróbicas y anaeróbicas en el sedimento libera iones hidrógeno adicionales a los liberados por la respiración aeróbica de la MO. La consecuencia de ello es que los valores más bajos en el pH del agua intersticial se habrían presentado entre invierno y primavera. Esto se explica con más detalle y en relación a la disolución de los carbonatos del sedimento en la siguiente sección.

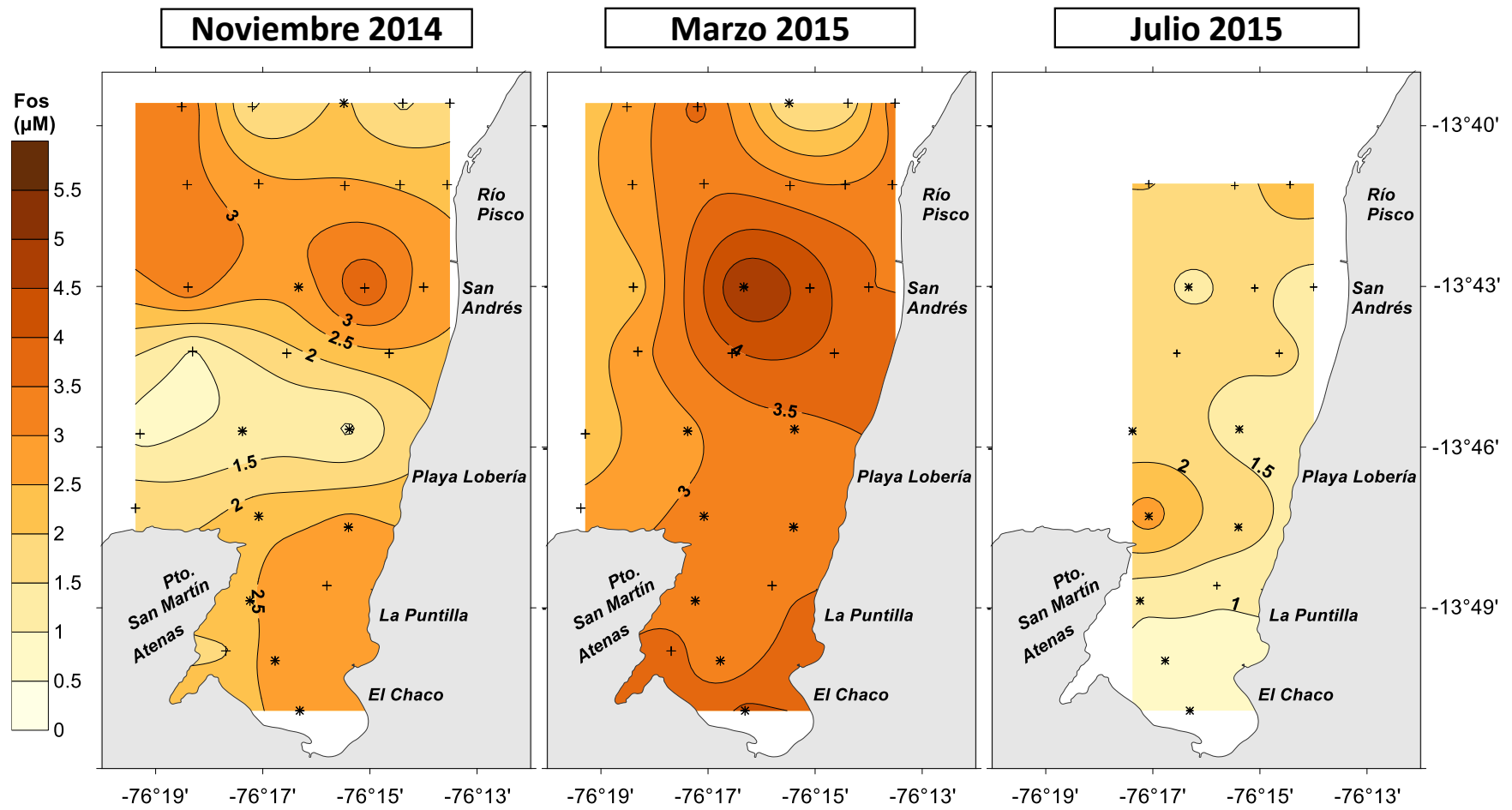


Figura 35. Distribución de fosfatos en el agua de fondo en la bahía de Paracas en los meses de las campañas de estudio (Datos de IMARPE, Proyecto Borde Costero 2014-2015)

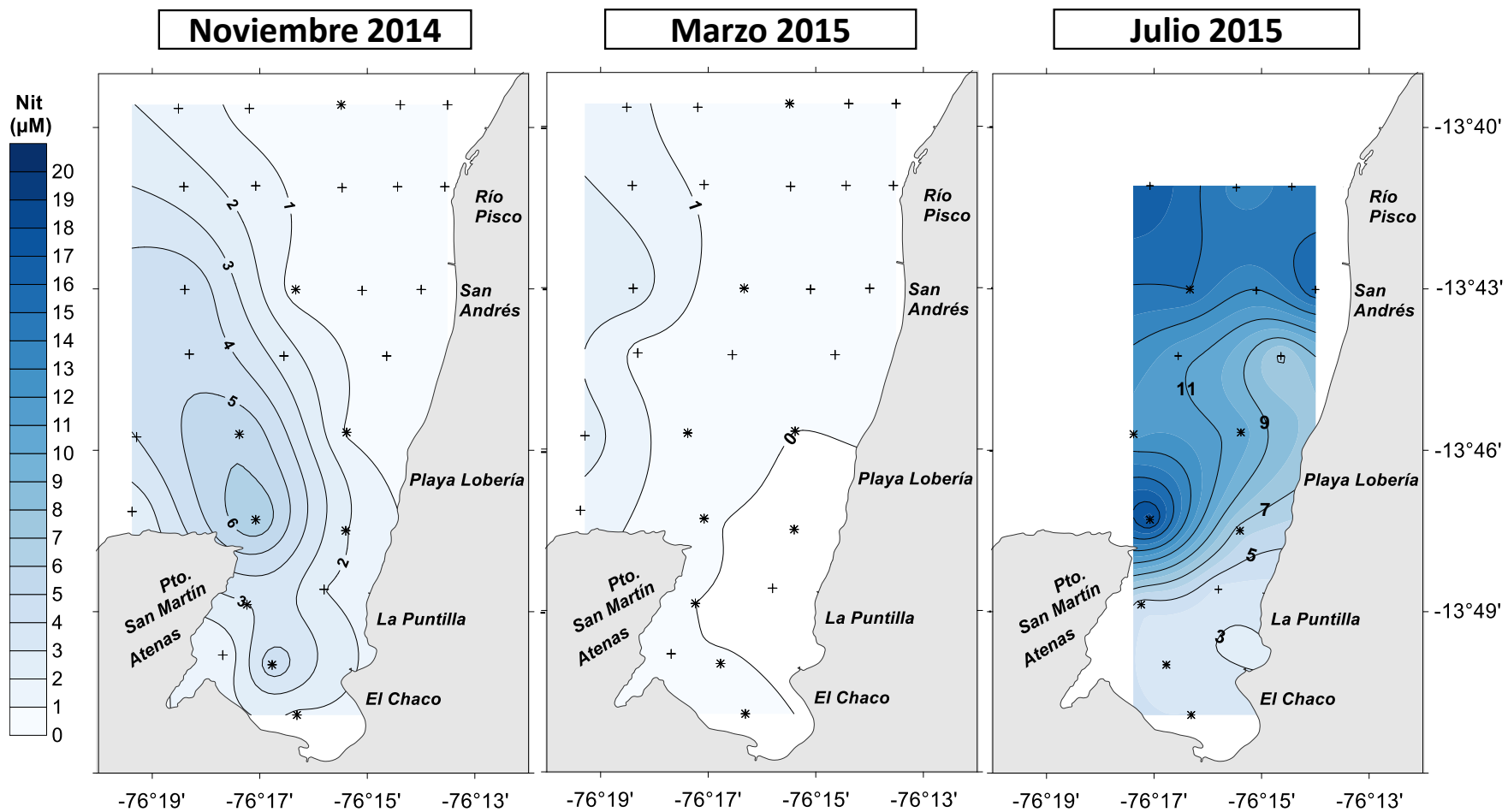


Figura 36. Distribución de fosfatos en el agua de fondo en la bahía de Paracas en los meses de las campañas de estudio (Datos de IMARPE, Proyecto Borde Costero 2014-2015).

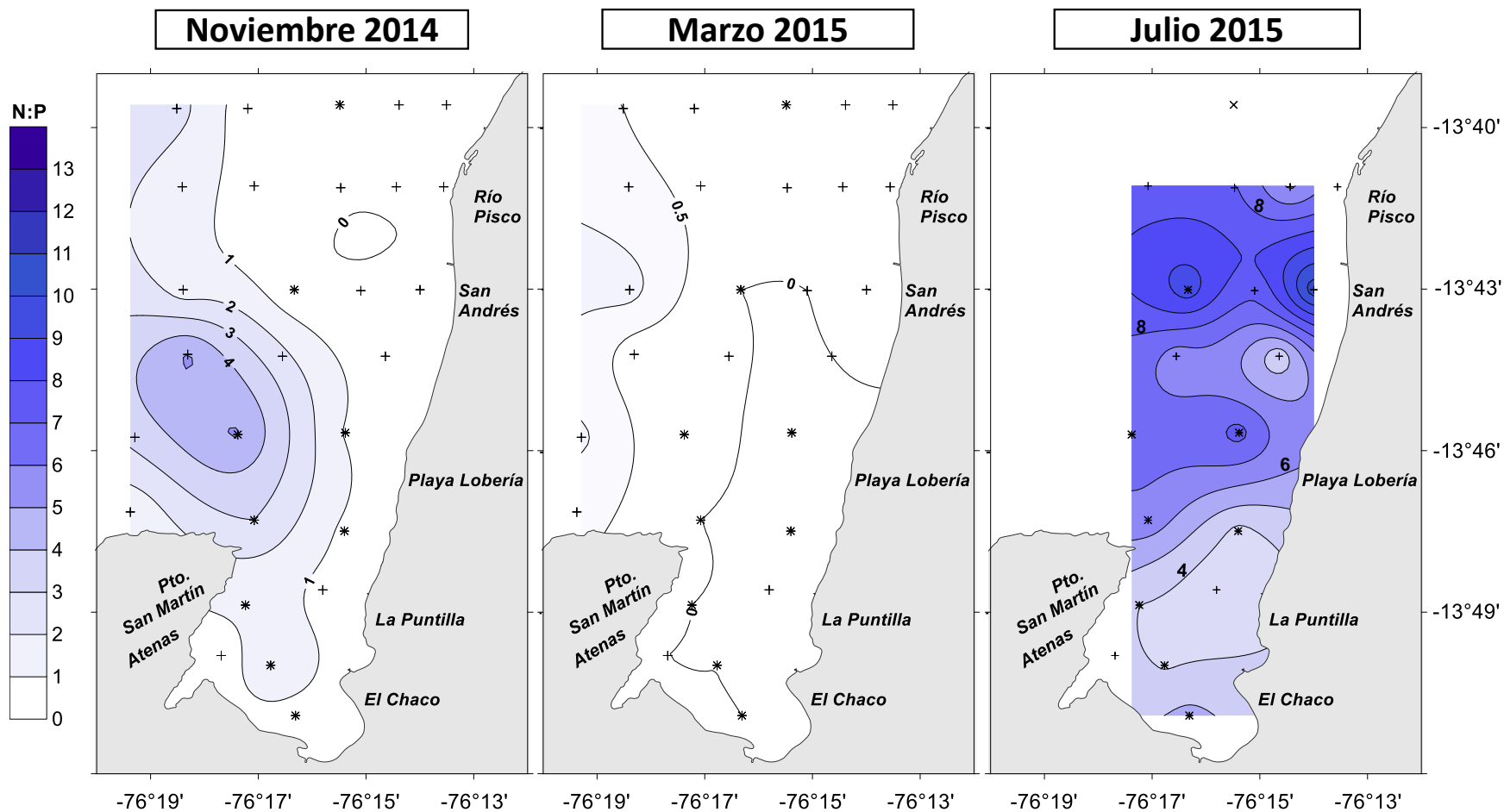
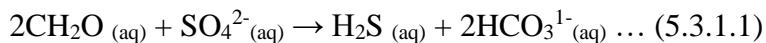


Figura 37. Distribución de la razón N:P en el agua de fondo en la bahía de Paracas en los meses de las campañas de estudio (Datos de IMARPE, Proyecto Borde Costero 2014-2015)

5.3. Efecto de la biogeoquímica de sedimentos de ambientes someros sobre los foraminíferos bentónicos calcáreos

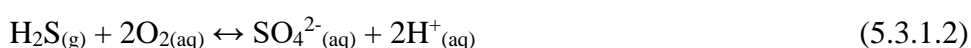
5.3.1. Preservación y disolución del carbonato de calcio (CaCO₃) en sedimentos someros

De acuerdo a la disponibilidad del oxígeno disuelto y la materia orgánica, se pueden generar altas tasas de respiración aeróbica y una gran disolución del CaCO₃ en los sedimentos (Moulin et al. 1985). Una vez que el oxígeno disuelto se agota, la respiración aeróbica es reemplazada por la respiración anaeróbica, incluso en el sedimento superficial (Abril et al. 1999). De todas las reacciones anaeróbicas, la sulfato-reducción es la que realiza la mayor parte de la degradación de la MO en los sedimentos costeros (Middelburg & Levin 2009), y puede resumirse en la siguiente ecuación:



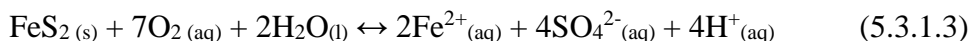
El H₂S producido puede generar una subsaturación temporal de los carbonatos en las etapas iniciales de la reacción (Walter & Burton 1990). Durante estas etapas iniciales el pH del agua intersticial disminuye promoviendo así la subsaturación y disolución de los carbonatos. La sulfato-reducción adicional genera el aumento en la alcalinidad mientras el pH se mantiene constante y el agua intersticial vuelve a sobresaturarse de carbonatos permitiendo la formación de CaCO₃ (Ben-Yaakov 1973; Morse et al. 2007).

Sin embargo, el H₂S que difunde hacia las capas oxidadas del sedimento lleva consigo un potencial de subsaturación de los carbonatos, ya que al exponerse al oxígeno se oxida generando ácido sulfúrico (ecuación 5.3.1.2) (Martin 1999), el cual rápidamente se disocia formando SO₄²⁻ y protones, los cuales disminuyen el pH.



En este estudio, se encontraron concentraciones de H₂S en los sedimentos superficiales mayores a las observadas en los sedimentos superficiales de la plataforma frente a Pisco (<400 nmol/cm³, Cardich et al. 2015) en todas las temporadas de muestreo. Estas condiciones reductoras del sedimento superficial coexistieron con las condiciones oxigenadas en el agua de fondo en julio de 2015 y probablemente esta coexistencia se extienda desde el inicio del invierno hasta finales de primavera en un año típico, como se mencionó en la sección anterior.

Si existe disponibilidad de Fe³⁺ en el sedimento, la sulfato-reducción se acopla a la reducción del Fe³⁺ dando como producto la precipitación de compuestos sólidos de azufre como el monosulfuro de hierro (FeS) y la pirita (FeS₂) (Berkeley et al. 2007). Sin embargo, la exposición de estos compuestos al oxígeno produce también ácido sulfúrico y disolución potencial de carbonatos (Sanders 2003) (ecuación 5.3.1.3). Pese a que no hubo mediciones directas de Fe³⁺ en los sedimentos de la Bahía de Paracas, existen observaciones de formas sólidas de azufre (CRS) que sugieren su disponibilidad (E. Flores, *comunicación personal*).



El intercambio de reactantes y productos de los procesos de respiración aeróbica y anaeróbica tiene implicancias notables en la preservación del CaCO_3 en el sedimento. Solo estos procesos de sulfato reducción y oxidación de las formas reducidas de azufre pueden por sí solos explicar hasta el 50% de la disolución de los carbonatos en los sedimentos costeros (Morse et al. 2007). Además, la bioperturbación del sedimento facilita la interacción de estos procesos ya que permite el contacto directo entre las zonas óxica y anóxica del sedimento y promueve la oxidación de compuestos reducidos de azufre generando la disolución de los carbonatos (Aller 1994; Green et al. 1998; Sanders 2003). Algunas observaciones sobre la macrofauna en los sedimentos de la zona de estudio indican que existe una mayor biomasa y presencia de estructuras bioperturbadoras como tubos de poliquetos del género *Diopatra* sp. al interior de la Bahía de Paracas (L. Quipúzcoa, *comunicación personal*).

5.3.2. Foraminíferos bentónicos calcáreos en ambientes sedimentarios favorables a la disolución de carbonatos

La segunda hipótesis de este trabajo no pudo probarse debido a que la abundancia de la comunidad de foraminíferos bentónicos, así como la abundancia del grupo de foraminíferos calcáreos, fueron mayores en marzo de 2015 en contraste a lo que se esperaba para ese mes en relación al pH del agua de fondo. Las menores abundancias fueron encontradas más bien en noviembre de 2014 (Anexo A9).

Además, el grupo de foraminíferos no calcáreos tuvo una mayor participación en la comunidad en noviembre de 2014 y una menor en marzo de 2015 (Anexo A10), que también contrasta a lo planteado en la hipótesis. También, dentro del grupo de foraminíferos calcáreos, la dominancia de las especies más robustas (*B. costata* y *B. elegantissima*) tuvo un claro patrón espacial, mas no así temporal (Anexo A11).

De acuerdo al comportamiento del pH del agua intersticial que difiere del agua de fondo, se puede afirmar que el pH del sedimento superficial está más influenciado por los procesos intensos que se dan en el mismo, que por la influencia del pH del agua suprayacente, tal como se mencionó en la sección 5.2.3. Los datos de pH intersticial con que se contaron, solo exhibieron un posible efecto sobre la abundancia de foraminíferos calcáreos de acuerdo a la tabla de correlaciones entre las variables abióticas y los parámetros comunitarios (Tabla 17). Sin embargo, el efecto sobre la comunidad pudo ser más claro si se contara con datos registrados en el mes de noviembre de 2014 ya que, como se mencionó en la sección 5.2.3, los valores más bajos de pH de los sedimentos en la Bahía de Paracas se habrían dado en noviembre de 2014. De acuerdo a lo mencionado en la sección 5.3.1, la coexistencia de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en el sedimento entre invierno y primavera serían responsables de la disolución del carbonato biogénico afectando así a la comunidad de foraminíferos en términos de abundancia total y del grupo calcáreo, abundancia relativa del grupo de no calcáreos y dominancia de las especies de testa calcárea más robusta. La interacción entre las condiciones aeróbicas y anaeróbicas en el microhábitat del sedimento superficial pueden originarse también debido al efecto de las mareas de sicigia y cuadratura en la

resuspensión del sedimento, lo cual conduce a la disolución de los carbonatos (Abril et al. 1999).

En la Tabla 17 también se encontró que la MOT y la Chl-a se correlacionaron negativamente con la diversidad de la comunidad y de las especies calcáreas; y positivamente con la proporción de foraminíferos calcáreos robustos. Debido a que estas dos variables representan la materia orgánica disponible en el sedimento y que, de acuerdo a la buena correlación entre ambas (Tabla 16), se podría deducir que el origen de esta materia orgánica es casi enteramente el fitoplancton. La relación inversa entre estas dos variables y la diversidad de especies y la relación directa entre las mismas y la proporción de especies calcáreas robustas representan la misma condición ya que cuando la proporción de las especies calcáreas robustas es mayor, la comunidad presenta una menor diversidad debido a la ausencia de especies de testa más frágil. La asociación entre la materia orgánica y la diversidad refleja el papel de la materia orgánica como sustrato de las reacciones diagenéticas que producen tanto condiciones de preservación de carbonatos biogénicos como condiciones para su disolución. Es así que los ambientes someros con alta sedimentación de materia orgánica fresca tienen sedimentos superficiales donde la degradación aeróbica y anaeróbica generan la disminución del pH intersticial (Koretsky et al. 2005; Woodroffe et al. 2005), afectando la diversidad de los foraminíferos bentónicos.

La proporción de calcáreos robustos exhibió una correlación positiva con la arcilla y negativa con el limo. Esto respondería a los patrones espaciales de tal proporción, el limo y la arcilla. Al igual que la MOT y la Chl-a, la arcilla se presentó más abundante adentro de la bahía probablemente debido a que esa zona presenta una

hidrodinámica poco intensa que permite la sedimentación de las partículas (Velazco & Solís 2000), sobre todo las más finas como la arcilla. En tal sentido la correlación positiva de esta con la proporción de foraminíferos calcáreos robustos no se debería a un efecto directo de la arcilla sobre los foraminíferos. Del mismo modo, la correlación negativa de esta proporción con el limo se debería principalmente a que el patrón espacial del limo es opuesto al de la arcilla.

Además del uso de indicadores comunitarios, la abundancia de testas vacías (muertos) y la proporción de las testas vacías del número total de testas (vivos y muertos) son indicadores que deben ser considerados para evaluar condiciones favorables para la disolución de carbonatos biogénicos en el sedimento. A diferencia de los individuos vivos, que pueden recalcificar sus testas cuando hay una mejora temporal de las condiciones de saturación de los carbonatos en el agua intersticial (Le Cadre et al. 2003; Woodroffe et al. 2005) y que incluso algunas especies lo hacen en condiciones de subsaturación (Dissard et al. 2010), las testas vacías expuestas a la subsaturación del CaCO_3 se disuelven espontáneamente (Green et al. 1993), lo cual las hace un buen indicador de condiciones favorables para la disolución existentes en el sedimento.

En este estudio, la abundancia de testas vacías y su proporción del número total de testas (vivas y muertas) fueron mínimas en noviembre de 2014 (anexo A12), sugiriendo mayores condiciones de disolución en este mes. Esto es consistente con los estudios que plantean que en la diagénesis temprana del sedimento las testas calcáreas vacías pueden disolverse fácilmente en ambientes que presentan tanto condiciones aeróbicas como anaeróbicas de respiración microbiana (Berkeley et al. 2007). Además, la mayor participación de los foraminíferos no calcáreos (en

especial los tectináceos) en noviembre concuerda con algunos estudios que plantean que estos serían más resistentes a las condiciones acidificadas por no poseer material calcáreo en su testa (Bernhard et al. 2009).

Los bajos valores de pH en el agua intersticial, sin embargo, no aseguran la disolución de las testas calcáreas, ya que, como indican Haynert et al. (2012), los niveles de alcalinidad total en los sedimentos que llegan a ser mayores al agua de fondo pueden amortiguar el efecto del pH sobre el estado de saturación del CaCO_3 (ω). Estos autores encontraron que en un ambiente somero y semi-cerrado del Mar Báltico (Flensburg Fjord), el pH en el centímetro superficial fue siempre bajo ($\text{pH} < 7.8$) en un ciclo anual, pero los altos niveles de la alcalinidad total (A_T) del agua intersticial, mantuvieron el estado sobresaturado del CaCO_3 ($\omega > 1$) casi todo el tiempo y la comunidad de foraminíferos fue mínimamente afectada, pues solo se observó fluctuaciones en una sola especie calcárea. Por lo anterior, el estado de saturación de los carbonatos (ω) sería la variable que tendría un efecto claro sobre los foraminíferos bentónicos calcáreos y debe ser calculada para entender los procesos de disolución y preservación de las testas (Haynert et al. 2012).

Si bien en la Bahía de Paracas no se encontró una situación tan extrema como lo reportado por Green et al. (1993, 1998) en los sedimentos someros del estrecho de Long Island, en donde los foraminíferos bentónicos calcáreos (vivos y testas vacías) desaparecen completamente en un ciclo estacional debido a la intensa interacción entre el oxígeno y los compuestos reducidos de azufre en invierno, las diferencias espaciales y temporales del número de testas vacías y de la proporción de testas vacías del total (Anexo 12), sugieren que al interior de la Bahía de Paracas las condiciones de disolución de carbonatos biogénicos se mantienen más tiempo que

en el resto de la zona de estudio. Si bien es cierto que existió una correlación negativa significativa entre el número de testas vacías y el pH del agua de fondo, esta relación sería indirecta debido a que, como se mencionó anteriormente, el pH del agua de fondo tuvo una tendencia opuesta a la del pH intersticial entre los meses de verano e invierno.

5.3.3. Implicancias en la interpretación de los registros sedimentarios

Según Cardich (2012), los sedimentos de la plataforma frente a Perú central presentan buenas condiciones para la preservación de las testas calcáreas de foraminíferos bentónicos y las hace útiles en las reconstrucciones paleoambientales. La composición de foraminíferos bentónicos calcáreos en la comunidad fósil (tafocenosis) del registro sedimentario refleja las condiciones ambientales que dominaron en el hábitat bentónico frente a Perú central. Es así que las mayores abundancias relativas de *B. costata* y *N. auris* (especies asociadas) en el registro sedimentario reflejan periodos de gran sedimentación de fitodetritus y anoxia en el hábitat bentónico (Cardich 2012).

La asociación entre *B. costata* y *N. auris* también fue observada en la biocenosis en este estudio (Figura 16). Sin embargo, *B. elegantissima* estuvo más fuertemente asociada a *B. costata* (Figura 16 y Figura 17) ya que ambas especies se presentaron abundantes en todas las estaciones (anexo A14) y principalmente porque conformaron casi la totalidad de la comunidad en las estaciones al interior de la bahía, donde se hipotetiza que existen las condiciones más favorables para la disolución de todo el área de estudio. Por tal motivo se propone que los registros

sedimentarios de la plataforma que muestren una comunidad preservada de foraminíferos bentónicos dominada principalmente por *B. costata* y *B. elegantissima* reflejarían que el ambiente sedimentario estuvo expuesto a frecuentes fluctuaciones de anoxia y oxigenación en los sedimentos, condiciones que son típicas de ambientes someros sometidos a altos flujos de materia orgánica. En cambio, una co-dominancia de estas especies con *N. auris* y/o *V. fragilis* en el registro sedimentario, o una mayor abundancia relativa de estas últimas sobre las primeras, reflejaría la prevalencia de condiciones sulfídicas (anóxicas) y de alta alcalinidad en los sedimentos superficiales.

6. CONCLUSIONES

- En la Bahía de Paracas la hipoxia se presenta estacionalmente en los meses de verano en el agua de fondo. Sin embargo, el agua suprayacente al sedimento está sujeta a una hipoxia más prolongada e intensa debido a que, en el sedimento superficial, la degradación aeróbica de la MO y la re-oxidación de compuestos reducidos consumen el poco oxígeno disponible del agua suprayacente.
- Nuestros resultados son consistentes con la primera hipótesis de investigación, ya que se puso en evidencia la estacionalidad del pH del agua de fondo en la Bahía de Paracas, la cual se caracteriza por presentar menores valores en el verano, temporada en la que existe mayor sedimentación de MO y mayor frecuencia de eventos de estratificación que promueven el consumo del oxígeno y la disminución del pH en el agua de fondo.
- La comunidad de foraminíferos bentónicos en la Bahía de Paracas, en comparación con otros ambientes marinos someros, es poco diversa. La hipoxia condiciona la baja diversidad de la comunidad especialmente en los meses de verano y determina una comunidad fuertemente dominada por especies de testa calcárea hialina, con baja representatividad de especies no calcáreas.

- La segunda hipótesis de investigación es rechazada en cuanto al rol del pH del agua de fondo sobre los parámetros comunitarios y la composición de especies, ya que las abundancias de foraminíferos calcáreos y la representación de especies de testa robusta y de especies no calcáreas en la comunidad fueron independientes de la variación espacial y temporal del pH del agua de fondo.
- No obstante, nuestros resultados sugieren que el pH del agua intersticial es más bajo que el pH del agua de fondo entre invierno y primavera debido a que en este periodo, en el que los sedimentos superficiales están más expuestos a la oxigenación, la degradación aeróbica de la MO y la re-oxidación de compuestos reducidos disminuyen el pH del agua intersticial y establecen condiciones potenciales de disolución de los carbonatos. Por ello, se hipotetiza que las menores abundancias de foraminíferos bentónicos calcáreos y la mayor representación de especies de testa calcárea robusta y de especies no calcáreas en la comunidad se expresan en condiciones persistentes de bajo pH en el agua intersticial en primavera.
- *Buliminella elegantissima* y *Bolivina costata* son las especies más tolerantes a los bajos niveles de pH en el agua intersticial en la Bahía de Paracas, por lo que su dominancia en la comunidad es indicadora de condiciones favorables a la disolución en los sedimentos.

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario implementar mediciones de pH y alcalinidad total en el agua intersticial para caracterizar el estado de saturación del CaCO_3 en el mismo. Esto permitirá establecer ambientes sedimentarios favorables para la disolución o la preservación de los foraminíferos calcáreos.
- Analizar la profundización de la comunidad de foraminíferos en la columna de sedimento para evaluar la influencia del aumento en la concentración de sulfuros con la profundidad sobre el estado de saturación del CaCO_3 .
- Analizar la tafocenosis de las especies de foraminíferos calcáreos para evaluar diferenciadamente su resistencia a las condiciones de disolución generadas por la diagénesis temprana
- Realizar mediciones estructurales externas (longitud y grosor) así como mediciones microestructurales internas (grosor y volumen de las cámaras) de las testas de los foraminíferos calcáreos para generar indicadores de calcificación y disolución.

8. REFERENCIAS

- Abril G, Etcheber H, Le Hir P, Bassoullet P, Boutier B, Frankignoulle M. Oxic/anoxic oscillations and organic carbon mineralization in an estuarine maximum turbidity zone (The Gironde, France). *Limnology and Oceanography*. 1999;44(5):1304–15.
- Aguirre-Velarde A, Flye-Sainte Marie J, Thouzeau G, Mendo J, Jean F. Impacto de las bajas concentraciones de oxígeno sobre el cultivo de la concha de abanico en la Bahía de Paracas , Pisco. Libro de Resúmenes IV CONCIMAR. Lima: Centro Editorial UPCH; 2014.
- Aguirre-Velarde A, Jean F, Thouzeau G, Flye-sainte-marie J. Effects of progressive hypoxia on oxygen uptake in juveniles of the Peruvian scallop , *Argopecten purpuratus* (Lamarck , 1819). *Aquaculture*. Elsevier B.V.; 2016;451:385–9.
- Akpati BN. Foraminiferal distribution and environmental variables in eastern Long Island Sound, New York. *Journal of Foraminiferal Research*. 1975;5(2):127–44.
- Aller RC. Carbonate dissolution in nearshore terrigenous muds: The role of physical and biological reworking. *Journal of Geology*. 1982;90(1):79–95.
- Aller RC. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: effects of redox oscillation. *Chemical Geology*. 1994;114(3-4):331–45.
- APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20^a ed. Washington, DC: American Public Health Association; 1999.
- APROPISCO. Gestión de efluentes [Internet]. Perú. 2012 [citado 10 de marzo de 2016]. Recuperado a partir de: http://www.apropisco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=65
- Armynot du Châtelet É, Bout-roumazeilles V, Riboulleau A, Trentesaux A. Sediment (grain size and clay mineralogy) and organic matter quality control on living benthic foraminifera. *Revue de Micropaléontologie*. 2009;52:75–84.
- Bandy OL, Ingle JC, Resig JM. Foraminifera, Los Angeles County outfall area, California. *Limnology and Oceanography*. 1964;9:124–37.
- Ben-Yaakov S. pH buffering of pore water of recent anoxic marine sediments. *Limnology and Oceanography*. 1973;18(1):86–94.
- Berkeley A, Perry CT, Smithers SG, Horton BP, Taylor KG. A review of the ecological and taphonomic controls on foraminiferal assemblage development in intertidal environments. *Earth-Science Reviews*. 2007;83(3-4):205–30.
- Bernhard JM, Sen Gupta BK. Foraminifera of oxygen-depleted environments. En: Sen Gupta BK, editor. *Modern Foraminifera*. New York: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 201–16.
- Bernhard JM, Mollo-Christensen E, Eisenkolb N, Starczak VR. Tolerance of

- allogromiid Foraminifera to severely elevated carbon dioxide concentrations: Implications to future ecosystem functioning and paleoceanographic interpretations. *Global and Planetary Change*. Elsevier B.V.; 2009;65(3-4):107–14.
- Boltovskoy E, Wright R. *Recent Foraminifera*. 2^a ed. The Hague: Springer Science+Business Media; 1976.
- Booth JAT, McPhee-Shaw EE, Chua P, Kingsley E, Denny M, Phillips R, et al. Natural intrusions of hypoxic, low pH water into nearshore marine environments on the California coast. *Continental Shelf Research*. Elsevier; 2012;45:108–15.
- Borges A V., Gypens N. Carbonate chemistry in the coastal zone responds more strongly to eutrophication than ocean acidification. *Limnology and Oceanography*. 2010;55(1):346–53.
- Burnett LE. The Challenges of Living in Hypoxic and Hypercapnic Aquatic Environments. *American Zoologist*. 1997;37:633–40.
- Burnett LE, Stickle B. Physiological Responses to Hypoxia. En: Rabalais NN, Turner RE, editores. *Coastal and Estuarine Studies Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems*. Washington, DC; 2001. p. 101–14.
- Cabello R, Tam J, Jacinto ME. Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Peru) en junio del 2000. *Revista Peruana de Biología*. 2002;9(2):49–65.
- Le Cadre V, Debenay JP, Lesourd M. Low pH effects on *Ammonia beccarii* test deformation: Implications for using test deformations as a pollution indicator. *Journal of Foraminiferal Research*. 2003;33(1):1–9.
- Cardich J. Especies de foraminíferos bentónicos indicadoras del estado de óxido-reducción del sedimento superficial en el margen continental central del Perú. Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2012.
- Cardich J, Gutiérrez D, Romero D, Pérez A, Quipúzcoa L, Marquina R, et al. Calcareous benthic foraminifera from the upper central Peruvian margin: control of the assemblage by pore water redox and sedimentary organic matter. 2015;535:63–87.
- Cardich J, Morales M, Quipúzcoa L, Sifeddine A, Gutiérrez D. Anoxia. Altenbach A V., Bernhard JM, Seckbach J, editores. Dordrecht: Springer Netherlands; 2012 [citado 24 de marzo de 2014];21. Recuperado a partir de: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-1896-8>
- Cline JD. Spectrophotometric Determination of Hydrogen Sulfide in Natural Waters. *Limnology and Oceanography*. 1969;14(3):454–8.
- Conover WJ, Johnson ME, Johnson MM. A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf data bidding. *Technometrics*. 1981;23(4):351–61.
- Copin-Montégut C, Raimbault P. The Peruvian upwelling near 15°S in August

1986. Results of continuous measurements of physical and chemical properties between 0 and 200 m depth. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1994;41(3):439–67.
- Copin-Montégut G. *Chimie de l'eau de mer*. Institut Océanographique; 1996.
- Culver SJ, Buzas MA. Biogeography of Nerithic Benthic Foraminifera. En: Sen Gupta BK, editor. *Modern Foraminifera*. New York: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 93–102.
- Dean WEJ. Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison With Other Methods. *Journal of Sedimentary Research*. Society for Sedimentary Geology; 1974;44(1).
- Dias BB, Hall-Spencer JM, Hart MB. Modern seawater acidification: the response of foraminifera to high-CO₂ conditions in the Mediterranean Sea. *Journal of the Geological Society*. 2010;167:843–6.
- Diaz RJ. Overview of Hypoxia around the World. *Journal of Environmental Quality*. 2001;30:275–81.
- Diaz RJ, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*. 2008;321(5891):926–9.
- Dissard D, Nehrke G, Reichart GJ, Bijma J. Impact of seawater pCO₂ on calcification and Mg/Ca and Sr/Ca ratios in benthic foraminifera calcite: results from culturing experiments with *Ammonia tepida*. *Biogeosciences*. 2010;7:81–93.
- Diz P, Francés G, Vilas F. Microhábitats de foraminíferos bentónicos en la ría de Vigo y su aplicación a la interpretación paleoecológica. *Journal of Iberian Geology*. 2000;26:99–119.
- Donnici S, Serandrei-barbero R, Bonardi M, Sperle M. Benthic foraminifera as proxies of pollution: The case of Guanabara Bay (Brazil). *Marine pollution bulletin*. 2015;64(2012):2015–28.
- Eichler PPB, Eichler BB, Sen Gupta BK, Rösch A. Foraminifera as indicators of marine pollutant contamination on the inner continental shelf of southern Brazil. *Marine pollution bulletin*. Elsevier Ltd; enero de 2012;64(1):22–30.
- Feely R a, Sabine CL, Lee K, Berelson W, Kleypas J, Fabry VJ, et al. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*. 2004;305(5682):362–6.
- Feely RA, Sabine CL, Hernandez-Ayon JM, Ianson D, Hales B. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*. 2008;320:1490–2.
- Flores R, Gutiérrez D, Tam J, Sánchez S, Orozco R. Informe Técnico sobre la Dinámica de la Bahía de Paracas y Recomendaciones para su Manejo. Informe Interno del Imarpe; 2004. p. 21.
- Frieder CA, Nam SH, Martz TR, Levin LA, Division O, Science A, et al. High

- temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Biogeosciences*. 2012;9:3917–30.
- Friederich GE, Ledesma J, Ulloa O, Chavez FP. Air-sea carbon dioxide fluxes in the coastal southeastern tropical Pacific. *Progress in Oceanography*. Elsevier Ltd; 2008;79(2-4):156–66.
- Galehouse. Sedimentation analysis. En: Carver R, editor. *Procedures in sedimentary petrology*. New York: John Wiley & Sons, Ltd; 1971. p. 69–94.
- Gattuso J-P, Hansson L. Ocean acidification: background and history. En: Gattuso J-P, Hansson L, editores. *Ocean acidification*. New York: Oxford University Press; 2011. p. 1–20.
- Glantz SA. *Primer of biostatistics*. New York: McGraw-Hill Medical; 2002.
- Gooday AJ. Benthic Foraminifera (Protista) as Tools in Deep-water Palaeoceanography: Environmental Influences on Faunal Characteristics. *Advances in Marine Biology*. 2003;46:3–90.
- Goubanova K, Echevin V, Dewitte B, Codron F, Takahashi K, Terray P, et al. Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru-Chile upwelling region: Diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. *Climate Dynamics*. 2010;36(7):1365–78.
- Graco M, Farías L, Gutiérrez D, Nielsen LP. Massive developments of microbial mats following phytoplankton blooms in a naturally eutrophic bay: Implications for nitrogen cycling. *Limnology and Oceanography*. 2001;46(4):821–32.
- Graco MI, Ledesma J, Flores G, Girón M. Nutrientes , oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Revista Peruana de Biología*. 2007;14(August):117–28.
- Green M a., Aller RC, Aller JY. Influence of carbonate dissolution on survival of shell-bearing meiobenthos in nearshore sediments. *Limnology and Oceanography*. 1998;43:18–28.
- Green MA, Aller RC, Aller JY. Carbonate dissolution and temporal abundances of Foraminifera in Long Island Sound sediments. *Limnology and Oceanography*. 1993;38(2):331–45.
- Green MA, Waldbusser GG, Reilly SL, Emerson K, O'Donnell S. Death by dissolution: Sediment saturation state as a mortality factor for juvenile bivalves. 2009;54(4):1037–47.
- Gutiérrez D, Bouloubassi I, Sifeddine A, Purca S, Goubanova K, Graco M, et al. Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(7):1–6.
- Gutiérrez D, Gallardo V a., Mayor S, Neira C, Vasquez C, Sellanes J, et al. Effects of dissolved oxygen and fresh organic matter on the bioturbation potential of macrofauna in sublittoral sediments off Central Chile during the 1997/1998 El Niño. *Marine Ecology Progress Series*. 2000;202:81–99.

- Guzmán M, Chávez J, Morón O, Sánchez S, Flores G. Evaluación de la calidad del medio ambiente marino en la bahía de Pisco - Paracas, 22 a 24 de mayo 1996. Informe Progresivo Instituto del Mar del Perú. 1997;54:3–29.
- Haman D, Baker MB, Seiglie GA. *Virgulinitella ossamagnifica* N.SP., from the miocene of Cabinda, Equatorial West Africa. *Journal of Foraminiferal Research*. 1993;23(3):205–8.
- Haynert K, Schönfeld J, 10.1594/PANGAEA.832994. Impact of changing carbonate chemistry, temperature, and salinity on growth and test degradation of the benthic foraminifer *Ammonia aomoriensis*. *Journal of Foraminiferal Research*. 2014;44(2):76–89.
- Haynert K, Schönfeld J, Polovodova-Asteman I, Thomsen J. The benthic foraminiferal community in a naturally CO₂-rich coastal habitat of the southwestern Baltic Sea. *Biogeosciences*. 2012;9:4421–40.
- Haynes JR. Foraminifera. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Londres: Macmillan Publishers LTD; 1981.
- Hayward BW, Figueira BO, Sabaa AT, Buzas MA. Multi-year life spans of high salt marsh agglutinated foraminifera from New Zealand. *Marine Micropaleontology*. 2014;109:54–65.
- Hofmann AF, Peltzer ET, Walz PM, Brewer PG. Hypoxia by degrees: Establishing definitions for a changing ocean. *Deep-Sea Research I*. Elsevier; 2011a;58:1212–26.
- Hofmann GE, Smith JE, Johnson KS, Send U, Levin LA, Micheli F, et al. High-frequency dynamics of ocean pH: a multi-ecosystem comparison. *PLoS ONE*. 2011b;6(12):1–11.
- Hyams-kaphzan O, Almogi-labin A, Benjamini C, Herut B. Natural oligotrophy vs. pollution-induced eutrophy on the SE Mediterranean shallow shelf (Israel): Environmental parameters and benthic foraminifera. *Marine pollution bulletin*. 2009;58:1888–902.
- IMARPE. Estado de la calidad ambiental en la Bahía de Pisco-Paracas y su relación con la mortandad de los recursos hidrobiológicos en Pisco [Internet]. Informe de Campo. Callao: IMARPE; 2015 [citado 11 de marzo de 2016]. p. 1–8. Recuperado a partir de: http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/infcam_pispara_18al20mar15.pdf
- Ingram R. Sieve analysis. En: Carver RE, editor. *Procedures in sedimentary petrology*. New York: John Wiley & Sons, Ltd; 1971. p. 49–67.
- IPCC. Summary for policy makers. En: Stocker TF, D. Qin G, Plattner K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al., editores. *Climate Change 2013: the physical science basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2013.
- Jones RW. *Foraminifera and their Applications*. New York: Cambridge University

Press; 2014.

- Jørgen Hansen H. Shell construction in modern calcareous foraminifera. En: Sen Gupta BK, editor. *Modern Foraminifera*. New York: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 57–70.
- Jorissen FJ, de Stigter HC, Widmark JGV. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*. diciembre de 1995;26(1-4):3–15.
- Kahru M, Mitchell BG, Diaz A, Miura M. MODIS Detects a Devastating Algal Bloom in Paracas Bay , Peru. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*. 2004;85:465–72.
- Klump JVAL, Martens S. Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin-II . Nutrient sediment-water exchange processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1981;45:101–21.
- Koretsky CM, Cappellen P Van, Dichristina TJ, Kostka JE, Lowe KL, Moore CM, et al. Salt marsh pore water geochemistry does not correlate with microbial community structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005;62:233–51.
- Kotler E, Martin RE, Liddell DW. Experimental analysis of abrasion and dissolution resistance of modern reef-dwelling foraminifera: Implications for the preservation of biogenic carbonate. *PALAIOS*. 1992;7(3):244–76.
- Ledesma J, Tam J, Graco M, León V, Flores G, Morón O. Caracterización de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente a la costa peruana entre 3°N y 14°S, 1999-2009. *Boletín del Instituto del Mar del Peru*. 2011;26(1-2):49–57.
- León V, Paulmier A, Ledesma J, Croot P, Graco M, Flores G, et al. pH como un trazador de la variabilidad biogeoquímica en el Sistema de Humboldt. *Boletín del Instituto del Mar del Peru*. 2011;26(1-2):19–24.
- Levin L a., Ekau W, Gooday a. J, Jorissen F, Middelburg JJ, Naqvi SW a., et al. Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos. *Biogeosciences*. 8 de octubre de 2009;6(10):2063–98.
- Libes SM. *Introduction to marine biogeochemistry*. Second Edi. Marine Chemistry. Elsevier Inc.; 2009.
- Mallon J. *Benthic Foraminifera of the Peruvian & Ecuadorian Continental Margin*. Kiel University; 2011.
- Marín V, Rodríguez L, Vallejo L, Fuenteseca J, Arce OY. Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*. 1993;66:479–91.
- Martin RA. *Taphonomy. A process approach*. University Press, Cambridge; 1999.
- Mayor S. Foraminíferos bentónicos de la plataforma continental peruana entre los 7° y 10° de latitud sur. *Universidad Nacional Agraria La Molina*; 1993.
- Middelburg JJ, Levin LA. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. 2009;1273–93.

- Morón OA. Características del ambiente marino frente a la costa peruana. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*. 2000;19(1-2):179–204.
- Morse JW, Arvidson RS, Lüttge A. Calcium Carbonate Formation and Dissolution. *Chemical Reviews*. 2007;107(2):342–81.
- Moulin E, Jordens A, Wollast R. Influence of the aerobic bacterial respiration on the early dissolution of carbonates in coastal sediments. En: Wollast R, Van Grieken R, editores. *Progress in Belgium oceanographic research*. University of Antwerp, Belgium; 1985. p. 196–208.
- Murray JW. The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Marine Micropaleontology*. 2001;41:1–7.
- Murray JW. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. New York: Cambridge University Press; 2006.
- Murray JW. Living benthic foraminifera: biogeographical distributions and the significance of rare morphospecies. *Journal of Micropalaeontology*. 2013;32(1):1–58.
- Páez M, Zúñiga O, Valdés J, Ortlieb L. Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micróxicos de la bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 2001;36(2):129–39.
- Paulmier A, Ruiz-Pino D, Garçon V. CO₂ maximum in the oxygen minimum zone (OMZ). *Biogeosciences*. 2011;8:239–52.
- Pettit LR, Smart CW, Hart MB, Milazzo M, Hall-spencer JM. Seaweed fails to prevent ocean acidification impact on foraminifera along a shallow-water CO₂ gradient. *Ecology and Evolution*. 2015;5(9):1784–93.
- Platon E, Sen Gupta BK, Rabalais NN, Turner RE. Effect of seasonal hypoxia on the benthic foraminiferal community of the Louisiana inner continental shelf: The 20th century record. *Marine Micropaleontology*. 2005;54(3-4):263–83.
- Psuty NP. Coastal foredune development under a diurnal wind regime, Paracas, Peru. *Journal of Coastal Research*. 2005;(42):68–73.
- Rabalais NN, Díaz RJ, Levin LA, Turner RE, Gilbert D, Zhang J. Dynamics and distribution of natural and human-caused coastal hypoxia. *Biogeosciences*. 2010;7:585–619.
- Rabalais NN, Turner RE. Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: Description, Causes and Change. En: Rabalais NN, Turner RE, editores. *Coastal hypoxia Consequences for living resources and ecosystems*. Washington, DC: American Geophysical Union; 2001. p. 1–36.
- Rabalais NN, Turner RE, Wiseman WJ. Gulf of Mexico Hypoxia, A.K.A. “The Dead Zone”. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2002;33(1):235–63.
- Reaves CM. Organic matter metabolizability and calcium carbonate dissolution in nearshore marine muds. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1986;56(4):486–94.
- Ruttenberg KC, Goñi MA. Phosphorus distribution, C:N:P ratios, and $\delta^{13}\text{C}(\text{oc})$ in

- arctic, temperate, and tropical coastal sediments: tools for characterizing bulk sedimentary organic matter. *Marine Geology*. 1997;139:123–45.
- Sánchez G, Córdova J, Ledesma J. Informe ambiental en la zona industrial pesquera de la bahía de Paracas, Pisco, Perú. 25 al 27 de Abril 1997.pdf. Informe Progresivo Instituto del Mar del Perú. 1997;67:3–19.
- Sanders D. Syndepositional dissolution of calcium carbonate in neritic carbonate environments : geological recognition , processes , potential significance. 2003.
- Schönfeld J, Alve E, Geslin E, Jorissen F, Korsun S, Spezzaferri S, et al. The FOBIMO (FORaminiferal BIO-MONitoring) initiative-Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*. Elsevier B.V.; 2012;94-95:1–13.
- Schunck H, Lavik G, Desai DK, Grosskopf T, Kalvelage T, Loscher CR, et al. Giant Hydrogen Sulfide Plume in the Oxygen Minimum Zone off Peru Supports Chemolithoautotrophy. *Plos One*. 2013;8(8):e68661.
- Sears M. Notes on the Peruvian coastal current. 1. An introduction to the ecology of Pisco Bay. *Deep Sea Research*. 1954;1(3):141–69.
- Sen-Gupta BK. Foraminifera in Marginal Marine Environments. En: Sen Gupta BK, editor. *Modern Foraminifera*. New York: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 141–60.
- Sen-Gupta BK, Kilbourne RT. Diversity of Benthic Foraminifera on the Georgia Continental Shelf. *Geological Society of America Bulletin*. 1974;85:969–72.
- Sen-Gupta BK, Machain-Castillo ML. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*. 1993;20:183–201.
- Serandrei-Barbero R, Morisieri M, Carbognin L, Donnici S. An inner shelf foraminiferal fauna and its response to environmental processes (Adriatic Sea , Italy). *Revista española de Micropaleontología*. 2003;35(2):241–64.
- STAP. Hypoxia and Nutrient Reduction in the Coastal Zone. Advice for Prevention, Remediation and Research. A STAP Advisory Document. Global Environment Facility. Washington, DC; 2011.
- Stott LD, Hayden TP, Griffith J. Benthic foraminifera at the Los Angeles county whites point outfall revisited. *Journal of Foraminiferal Research*. 1996;26(4):357–68.
- Strickland JDH, Parsons TR. *A practical handbook of seawater analysis*. Second Edi. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada; 1972.
- Tapia R, Lange CB, Marchant M. Living (stained) calcareous benthic foraminifera from recent sediments off Concepcion, central-southern Chile (similar to 36 degrees S). *Revista Chilena De Historia Natural*. 2008;81(3):403–16.
- Thornton SF, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal*

- and Shelf Science. 1994;38:219–33.
- Toefy R, Gibbons MJ. Regional generalisations about the relationships between the environment and foraminifera along the SW Cape coast, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier Ltd; 2014;80(1-2):330–7.
- Uthicke S, Momigliano P, Fabricius KE. High risk of extinction of benthic foraminifera in this century due to ocean acidification. *Scientific Reports*. 2013;3:1–5.
- Velazco F, Solís J. Estudio Sedimentológico de la Bahía de Paracas. Informe Progresivo Instituto del Mar del Perú. 2000;133:3–22.
- Verano R. Foraminíferos del litoral del departamento de Lima. *Revista Peruana de Biología*. 1974;1(1):63–80.
- Walter LM, Burton EA. Dissolution of recent platform carbonate sediments in marine pore fluids. *American Journal of Science*. 1990;290:601–43.
- Wetmore KL. Correlations between test strength, morphology and habitat in some benthic foraminifera from the coast of Washington. *The Journal of Foraminiferal Research*. 1987;17(1):1–13.
- Woodroffe SA, Horton BP, Whittaker JE. Intertidal mangrove foraminifera from the central Great Barrier Reef shelf, Australia: Implications for sea-level reconstruction. *Journal of Foraminiferal Research*. 2005;35(3):259–70.
- Zhang J, Gilbert D, Gooday AJ, Levin L, Naqvi SWA, Middelburg JJ, et al. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*. 2010;7(5):1443–67.

9. ANEXOS

A1. Variables físico-químicas para fondo y superficie de la columna de agua en el total de estaciones del proyecto Borde Costero del IMARPE en noviembre de 2014

Campaña	Estación	Superficie					Fondo				
		S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)	S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)
NOV-2014	1	35.02	18.70	4.00	7.73	0.26	34.87	15.90	1.52	7.81	1.37
	2	34.95	19.30	5.11	8.17	0.21	35.00	16.00	1.05	7.88	0.88
	3	35.38	19.00	4.09	8.05	0.23	35.13	17.50	3.09	8.00	2.63
	4	34.95	18.80	5.00	8.20	0.31	34.98	15.40	0.62	7.90	1.01
	5	34.49	19.20	5.49	8.12	0.15	34.99	16.00	1.24	7.84	0.70
	6	34.80	17.90	5.71	7.92	0.39	34.79	15.60	0.71	7.82	0.72
	7	34.96	17.90	5.23	8.11	0.67	34.93	15.20	1.67	7.80	0.65
	8	34.87	16.80	4.64	8.03	0.59	34.98	14.90	0.48	7.77	0.26
	9	34.97	19.10	6.19	8.34	0.21	34.98	15.60	0.48	7.65	0.44
	10	34.96	18.70	5.21	8.23	0.44	35.10	15.20	0.24	7.85	0.44
	11	34.97	20.40	2.86	8.37	0.21	34.98	16.00	0.62	7.81	0.44
	12	34.94	21.90	6.13	8.30	0.13	-	-	-	-	-
	13	35.13	20.30	6.39	8.27	0.08	-	-	-	-	-
	14	34.94	20.40	5.73	8.25	0.10	34.90	15.40	0.47	7.82	0.75
	15	35.02	20.90	6.19	8.28	0.10	34.96	15.40	0.24	7.83	0.49
	16	34.91	20.20	6.39	8.27	0.18	35.10	17.30	2.40	8.04	0.65
	17	34.94	20.20	6.15	8.30	0.13	34.79	19.70	3.34	8.14	0.88
	18	34.95	21.80	5.23	7.97	0.28	34.96	20.70	4.47	8.08	0.34
	19	34.96	22.00	7.10	8.33	0.44	-	-	-	-	-
	20	34.88	22.00	7.33	8.36	0.34	-	-	-	-	-
	21	34.97	21.80	7.14	8.38	0.41	-	-	-	-	-
	22	34.87	20.90	7.90	8.46	0.39	-	-	-	-	-
	23	-	20.70	7.98	8.40	0.57	-	-	-	-	-
	24	-	20.40	8.29	8.48	0.39	-	14.80	0.52	7.78	0.10
	25	35.08	20.30	8.09	8.44	0.44	34.93	17.50	5.33	8.23	2.20
	26	34.92	21.10	7.07	8.37	0.34	34.92	18.50	6.23	8.25	1.24
	27	34.92	21.30	6.87	8.16	0.36	34.93	20.50	6.42	8.27	0.59
	28	34.92	21.30	6.71	8.22	0.57	35.01	20.60	5.90	8.23	0.85

A2. Variables físico-químicas para fondo y superficie de la columna de agua en el total de estaciones del proyecto Borde Costero del IMARPE en marzo de 2015

Campaña	Estación	Superficie					Fondo				
		S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)	S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)
MAR-2015	1	35.11	17.90	1.56	7.54	0.13	35.17	16.30	0.00	7.73	0.46
	2	35.10	18.50	1.74	7.55	0.13	35.13	15.90	0.00	7.55	0.34
	3	35.10	16.90	1.75	7.55	0.39	35.11	16.10	1.04	7.72	0.28
	4	35.12	17.00	2.81	7.68	0.21	35.09	15.60	0.18	7.75	0.62
	5	35.11	19.00	1.75	7.60	0.21	35.12	16.70	0.00	7.67	0.57
	6	35.09	19.00	1.21	7.57	0.26	35.13	16.80	0.00	7.65	0.46
	7	34.94	17.80	1.93	7.68	0.31	35.12	15.70	0.47	7.76	0.41
	8	35.11	16.60	1.74	7.68	0.15	-	-	-	-	-
	9	35.12	16.40	2.24	7.73	0.26	35.11	15.50	0.37	7.72	0.15
	10	35.13	17.20	1.75	7.61	0.21	35.10	16.00	0.64	7.76	0.28
	11	35.13	18.60	0.93	7.54	0.36	35.04	16.80	0.00	7.59	0.80
	12	34.81	19.10	0.00	7.33	0.83	35.14	18.40	0.00	7.46	0.80
	13	35.00	19.90	0.88	7.57	0.46	35.14	16.40	0.00	7.61	0.98
	14	34.95	19.10	1.14	7.57	0.96	35.12	15.90	0.00	7.75	0.67
	15	34.41	18.90	1.75	7.66	0.75	34.79	15.70	0.00	7.76	0.75
	16	33.74	19.20	1.84	7.67	0.31	35.09	16.30	0.00	7.66	0.54
	17	33.17	19.50	4.09	7.67	0.26	35.13	17.10	0.00	7.59	0.52
	18	27.76	21.90	4.02	7.78	0.46	35.14	20.10	0.00	7.58	1.03
	19	34.76	22.90	2.33	7.72	0.21	-	-	-	-	-
	20	-	25.60	4.29	8.06	1.14	-	-	-	-	-
	21	33.14	25.30	4.35	8.16	1.39	-	-	-	-	-
	22	-	24.70	4.14	8.08	1.01	-	-	-	-	-
	23	33.09	2.70	4.07	8.05	1.52	-	-	-	-	-
	24	29.83	24.10	4.47	8.11	1.01	35.11	15.40	0.23	7.74	0.18
	25	31.73	23.90	3.63	8.09	0.90	35.11	15.70	0.00	7.68	0.96
	26	31.39	23.00	3.07	8.03	0.49	35.13	16.90	0.00	7.62	0.59
	27	32.07	23.20	2.87	7.83	0.34	35.12	17.70	0.00	7.53	0.93
	28	34.28	21.60	3.69	7.96	0.34	35.11	18.60	0.00	7.57	0.34

A3. Variables físico-químicas para fondo y superficie de la columna de agua en el total de estaciones del proyecto Borde Costero del IMARPE en julio de 2015.

Campaña	Estación	Superficie					Fondo				
		S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)	S (ups)	T (°C)	OD (mL/L)	pH (s/u)	Cl-a (µg/L)
JUL-2015	1	35.23	18.40	4.55	7.59	0.26	35.23	18.30	3.63	7.84	0.49
	2	35.18	19.10	5.11	8.00	3.87	35.18	18.70	4.59	7.94	1.45
	3	35.20	18.70	4.26	7.93	1.83	35.19	18.60	3.62	7.88	1.34
	4	35.21	20.40	5.69	7.97	1.58	35.21	18.80	4.41	7.89	2.48
	5	35.19	18.50	5.55	7.96	3.51	35.18	18.50	5.08	8.00	3.46
	6	35.19	18.50	4.36	7.89	1.89	35.19	18.40	4.36	7.90	1.14
	7	35.14	18.40	1.73	7.68	0.15	35.16	18.30	1.63	7.70	0.15
	8	35.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	35.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	35.10	18.70	2.60	7.75	0.31	35.16	18.50	2.00	7.73	0.62
	11	35.18	18.90	3.05	7.75	0.28	35.18	18.60	3.00	7.76	1.01
	12	35.19	19.20	3.98	7.89	0.85	-	18.90	3.90	7.88	1.16
	13	35.17	19.00	3.60	7.78	0.59	-	18.60	2.39	7.74	0.88
	14	35.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	35.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	35.15	18.90	2.40	7.79	0.44	35.18	18.40	1.79	7.72	0.44
	17	35.18	18.00	2.37	7.67	0.62	35.18	17.90	1.90	7.73	0.49
	18	35.21	17.90	2.42	7.70	0.46	35.22	17.90	2.32	7.72	0.41
	19	35.20	19.40	4.49	7.85	0.23	-	-	-	-	-
	20	35.21	18.60	2.90	7.74	0.26	-	18.50	2.23	7.75	0.31
	21	35.19	18.70	2.65	7.80	0.70	-	18.50	2.34	7.80	0.57
	22	35.18	18.60	2.84	7.87	0.34	-	18.10	1.43	7.77	0.85
	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	35.20	18.40	2.85	7.79	0.36	35.16	17.80	0.88	7.74	0.77
	26	35.19	18.50	3.01	7.90	0.54	35.13	18.30	2.77	7.79	0.85
	27	35.21	18.60	3.78	7.87	0.41	35.18	18.50	3.39	7.86	0.44
	28	35.07	18.60	4.64	7.75	0.52	35.16	18.60	3.71	7.89	0.41

A4. Análisis de varianza de las variables de agua de fondo. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
Temperatura							
Z	2	0.011	0.005	1.069	0.359	0.99	n.s.
Error	24	0.123	0.005				
Total	26	0.133					
C	2	31.510	15.757	31.960	< 0.001	0.051	<u>N M J</u>
Error	24	11.830	0.493				
Total	26	43.340					
Oxígeno						0.073	
Z	2	0.103	0.052	1.204	0.323		n.s.
C	2	5.377	2.688	62.891	< 0.001		<u>M N J</u>
Z:C	4	1.072	0.268	6.272	0.002		<u>SM BM PM PN BN PJ SN SJ BJ</u>
Error	18	0.769	0.043				
Total	26	7.321					
pH						0.142	
Z	2	0.007	0.004	0.346	0.712		n.s.
C	2	0.244	0.122	11.746	0.001		<u>M J N</u>
Z:C	4	0.094	0.024	2.265	0.102		n.s.
Error	18	0.187	0.010				
Total	26	0.533					
Salinidad						0.122	
Z	2	0.004	0.002	0.389	0.683		n.s.
C	2	0.221	0.110	22.960	< 0.001		<u>N M J</u>
Z:C	4	0.008	0.002	0.431	0.784		n.s.
Error	18	0.086	0.005				
Total	26	0.319					

A5. Análisis de varianza de la textura del sedimento. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
Arenas						0.779	
Z	2	0.4	0.200	0.003	0.997		n.s.
C	2	5.5	2.760	0.044	0.957		n.s.
Z:C	4	51.5	12.890	0.204	0.933		n.s.
Error	18	1139.8	63.320				
Total							
Limos						0.609	
Z	2	3455	1727.500	4.083	0.035		<u>B S P</u>
C	2	165	82.400	0.195	0.825		n.s.
Z:C	4	547	136.700	0.323	0.859		n.s.
Error	18	7616	423.100				
Total							
Arcillas						0.268	
Z	2	3488	1744.000	5.973	0.010		<u>P S B</u>
C	2	233	116.500	0.399	0.677		n.s.
Z:C	4	703	175.800	0.602	0.666		n.s.
Error	18	5256	292.000				
Total							

A6. Análisis de varianza de propiedades geoquímicas del sedimento. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
MOT						0.422	
Z	2	129.93	64.970	14.092	< 0.001		<u>S P B</u>
C	2	75.92	37.960	8.234	0.003		<u>J N M</u>
Z:C	4	16.7	4.170	0.906	0.482		n.s.
Error	18	82.98	4.610				
Total	26	305.53					
CaCO ₃						0.501	
Z	2	43.89	21.945	5.673	0.012		<u>S P B</u>
C	2	11.15	5.576	1.442	0.263		n.s.
Z:C	4	10.58	2.645	0.684	0.612		n.s.
Error	18	69.63	3.868				
Total	26	135.25					
Cl-a						0.519	
Z	2	2770	1384.800	5.876	0.012		<u>S P B</u>
C	2	728	364.000	1.545	0.242		n.s.
Z:C	4	1226	306.500	1.300	0.309		n.s.
Error	17	4006	235.700				
Total	25	8730					
Cl-a : feop						0.055	
Z	2	0.03128	0.016	1.238	0.315		n.s.
C	2	0.01656	0.008	0.655	0.532		n.s.
Z:C	4	0.0683	0.017	1.352	0.292		n.s.
Error	17	0.21471	0.013				
Total	25	0.33085					

A7. Abundancias relativas (%) de foraminíferos por grupo ecológico y fracción de tamaño en las estaciones y las campañas de muestreo

		ESTACIONES									
		1	2	4	6	7	10	11	16	26	Total
NOVIEMBRE - 2014	Calcáreos	23.9	48.1	94.4	56.3	82.6	72.5	92.0	96.0	66.4	77.9
	Tectináceos	75.0	51.9	5.6	43.6	17.4	27.5	8.0	3.0	29.6	21.2
	Aglutinados	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.9	4.0	1.0
	Fracción 63-150 μm	84.6	93.4	96.7	96.0	97.1	87.8	73.4	93.5	94.4	91.4
	Fracción 150-500 μm	15.4	6.6	3.3	4.0	2.9	12.2	26.6	6.5	5.6	8.6
MARZO - 2015	Calcáreos	94.4	94.5	100.0	99.3	92.2	97.2	96.8	94.6	92.9	95.6
	Tectináceos	5.6	5.5	0.0	0.7	7.8	2.8	3.2	5.2	6.3	4.3
	Aglutinados	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.8	0.1
	Fracción 63-150 μm	99.0	99.4	98.1	98.1	89.8	99.0	90.2	94.0	99.7	96.0
	Fracción 150-500 μm	1.0	0.6	1.9	1.9	10.2	1.0	9.8	6.0	0.3	4.0
JULIO - 2015	Calcáreos	95.0	93.2	98.2	98.5	86.1	97.9	98.6	52.3	46.4	81.3
	Tectináceos	1.2	0.2	1.8	1.5	6.1	1.4	1.2	0.4	38.7	4.0
	Aglutinados	3.9	6.6	0.0	0.0	7.8	0.7	0.3	47.3	14.8	14.7
	Fracción 63-150 μm	99.1	99.7	97.7	72.4	97.8	81.2	96.0	97.1	99.6	91.2
	Fracción 150-500 μm	0.9	0.3	2.3	27.6	2.2	18.8	4.0	2.9	0.4	8.8

A8. Análisis de varianza de la diversidad (riqueza) de toda la comunidad de foraminíferos bentónicos y de los foraminíferos bentónicos calcáreos del centímetro superficial de sedimento. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

Riqueza (S)	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
S total						0.680	
Z	2	41.22	20.611	9.982	< 0.001		<u>B P S</u>
C	2	16.33	8.167	3.955	0.026		<u>M N J</u>
Z:C	4	6.86	1.715	0.831	0.513		n.s.
Error	45	92.92	2.065				
Total	53	157.33					
S calcáreos						0.759	
Z	2	24.94	12.47	7.011	0.002		<u>B P S</u>
C	2	6.26	3.13	1.76	0.184		n.s.
Z:C	4	1.52	0.38	0.213	0.929		n.s.
Error	45	80.04	1.779				
Total	53	112.76					

A9. Análisis de varianza de la abundancia de toda la comunidad de foraminíferos bentónicos y de los foraminíferos bentónicos calcáreos del centímetro superficial de sedimento. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

Abundancia (N)	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
N Totales						0.493	
Z	2	11106402	5553201	1.147	0.327		n.s.
C	2	44772360	22386180	4.624	0.015		<u>N J M</u>
Z:C	4	17881925	4470481	0.923	0.459		n.s.
Error	45	217865300	4841451				
Total	53	291625987	37251313				
N Calcáreos						0.524	
Z	2	4567800	2283900	0.777	0.466		n.s.
C	2	54286834	27143417	9.23	< 0.001		<u>N J M</u>
Z:C	4	9430047	2357512	0.802	0.531		n.s.
Error	45	132332003	2940711				
Total	53	200616684	34725540				

A10. Análisis de varianza de la abundancia relativa de foraminíferos bentónicos no calcáreos en cada fracción de tamaño así como en toda la comunidad. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

Abundancia relat. No Calcáreos	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
Total						0.083	
Z	2	0.008	0.004	0.061	0.940		n.s.
C	2	1.150	0.575	8.751	0.001		<u>M J N</u>
Z:C	4	0.307	0.077	1.166	0.338		n.s.
Error	45	2.958	0.066				
Total	53	4.423					
(63 μ m)						0.074	
Z	2	0.004	0.002	0.053	0.948		n.s.
C	2	0.451	0.225	5.986	0.005		<u>M J N</u>
Z:C	4	0.187	0.047	1.242	0.307		n.s.
Error	45	1.693	0.038				
Total	53	2.335					
(150 μ m)						0.056	
Z	2	2.300	1.150	7.644	0.001		<u>S P B</u>
C	2	6.498	3.249	21.601	<0.001		<u>J M N</u>
Z:C	4	0.430	0.108	0.715	0.586		n.s.
Error	43	6.468	0.150				
Total	51	15.696					

A11. (Arriba) Análisis de Kruskal-Wallis de la fracción porcentual de los foraminíferos robustos la fracción de mayor tamaño. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultado del test post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni. (Abajo) Análisis de varianza de la fracción porcentual de los foraminíferos robustos la fracción de menor tamaño. Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

Calc. robustos (%)	Kruskal-Wallis		Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
	H ₍₂₎	(valor p)	
(150 μ m)			
Z	16.843	< 0.001	<u>P S B</u>
C	0.477	0.788	n.s.

Calc. robustos (%)	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
(63 μ m)						0.305	
Z	2	1.159	0.579	22.979	< 0.001		<u>S P B</u>
C	2	0.068	0.034	1.343	0.271		n.s.
Z:C	4	0.196	0.049	1.942	0.120		n.s.
Error	45	0.135	0.025				
Total	53	1.588					

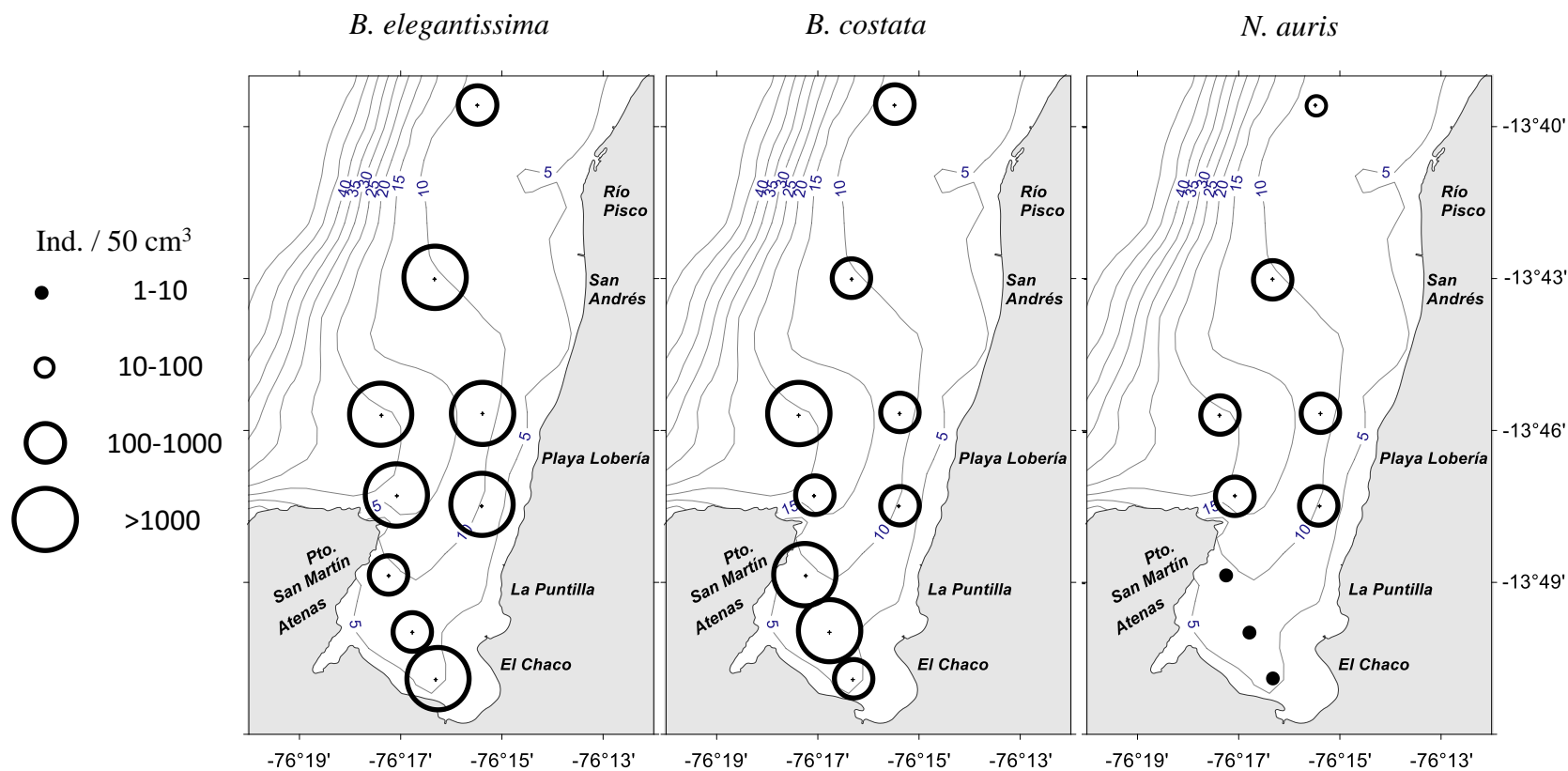
A12. Análisis de varianza de la abundancia (N) de testas calcáreas vacías y de la proporción de testas vacías del número total de testas calcáreas (%), en cada fracción de tamaño. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). Los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ (Tukey HSD).

Testas Vacías	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
(N)							
(63 μ m)						0.249	
Z	2	42.850	21.430	5.077	0.010		<u>B P S</u>
C	2	102.690	51.350	12.167	< 0.001		<u>N J M</u>
Z:C	4	39.880	9.970	2.363	0.067		<u>BN PN SN BM BJ PJ SJ PM SM</u>
Error	45	189.900	4.220				
Total	53	375.320					
(N)							
(150 μ m)						0.488	
Z	2	88.300	44.150	7.447	0.001		<u>B P S</u>
Error	51	302.400	5.930				
Total	53	390.700					
(N)							
(150 μ m)						0.451	
C	2	90.510	45.260	7.690	0.001		<u>N J M</u>
Error	51	300.160	5.890				
Total	53	390.670					
(%)							
(63 μ m)						0.409	
Z	2	0.438	0.219	3.359	0.044		<u>B P S</u>
C	2	0.650	0.325	4.983	0.011		<u>N M J</u>
Z:C	4	0.107	0.027	0.408	0.802		n.s.
Error	45	2.937	0.065				
Total	53	4.132					
(%)							
(150 μ m)						0.088	
Z	2	0.120	0.060	0.652	0.527		n.s.
C	2	0.860	0.430	4.665	0.015		<u>N J M</u>
Z:C	4	0.355	0.089	0.964	0.438		n.s.
Error	39	3.594	0.092				
Total	47	4.929					

A13. Análisis de varianza de nutrientes en el agua de fondo. El factor espacial (Z = zona) tiene tres grupos (B: bahía interior, S: exterior somero y P: exterior profundo). El factor temporal (C = campaña) tiene 3 grupos (N: noviembre, M: marzo y J: julio). Se muestran los grupos homogéneos con un nivel de significancia $\alpha < 0.1$ como resultados del test post hoc Tukey HSD. Se incluye el valor p de la prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen. n.s.: no significativo.

	g.l.	SC	CM	F	valor p	Pr. Fligner (valor p)	Grupos homogéneos ($\alpha = 0.1$)
Fosf.						0.331	
Z	2	0.007	0.003	0.005	0.995		n.s.
C	2	14.915	7.457	11.792	0.001		<u>J N M</u>
Z:C	4	3.245	0.811	1.283	0.316		n.s.
Error	17	10.751	0.632				
Total	25	28.918					
Nitra.						0.146	
Z	2	94.200	47.080	11.745	0.001		<u>B S P</u>
C	2	363.100	181.540	45.291	< 0.001		<u>M N J</u>
Z:C	4	112.800	28.210	7.038	0.002		<u>B_M S_M S_N P_M B_N B_J P_N S_J P_J</u>
Error	17	68.100	4.010				
Total	25	638.200					
N:P						0.128	
Z	2	13.070	6.530	3.771	0.044		<u>B S P</u>
C	2	175.380	87.690	50.608	< 0.001		<u>M N J</u>
Z:C	4	21.500	5.370	3.102	0.044		<u>B_M S_M P_M S_N B_N P_N B_J P_J S_J</u>
Error	17	29.460	1.730				
Total	25	239.410					

A14. Distribución espacial de las abundancias (ind/ 50 cm³) de las principales especies calcáreas en la zona de estudio

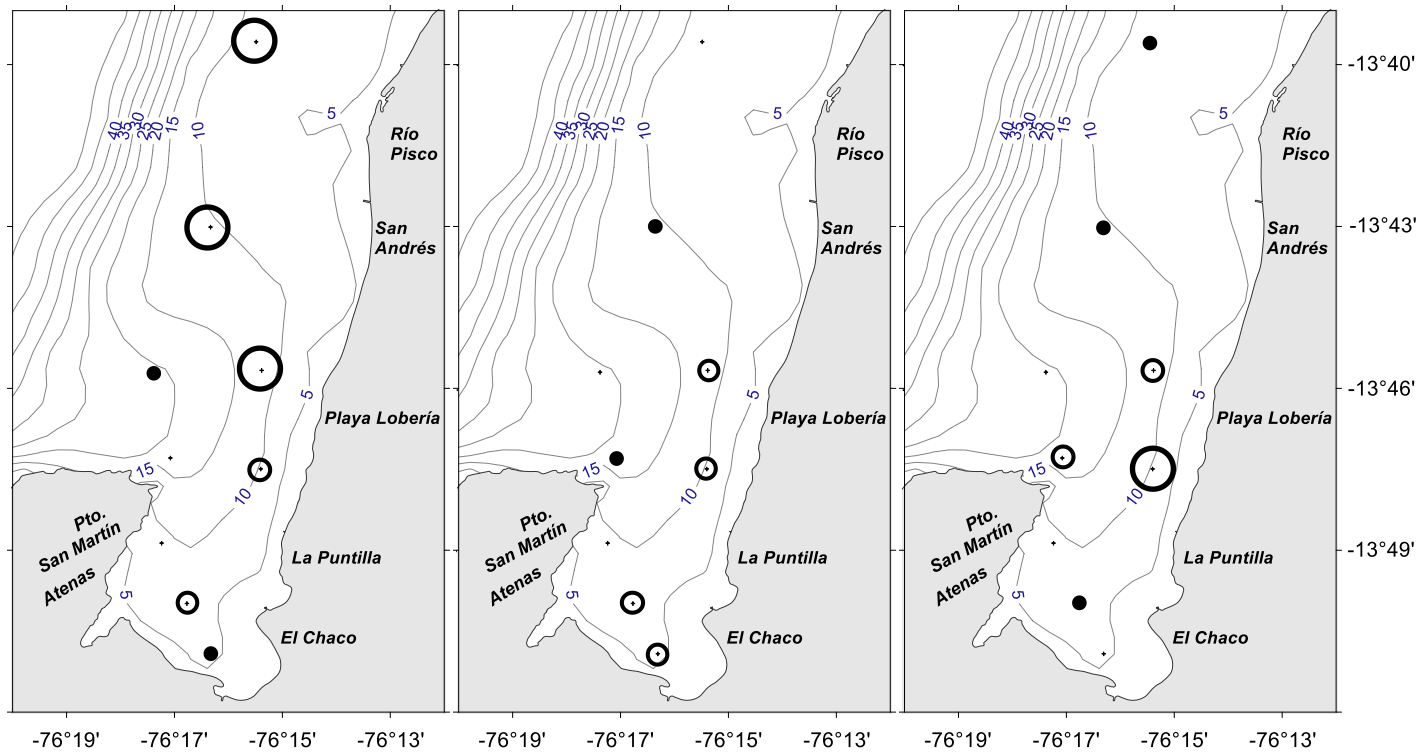
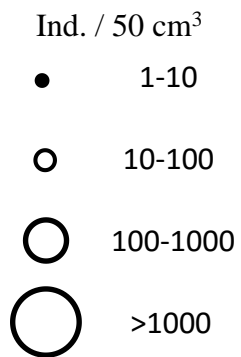


Continúa...

V. fragilis

Ammonia sp.

Discorbis sp.



A15. Fotografía del fenómeno de “aguas blancas” o “aguas lechosas” en la Bahía de Paracas, tomada el 29 de marzo de 2015 (Cortesía de E. Flores).



A16. Fotografías bajo el microscopio estereoscópico de especies de foraminíferos 'frágiles' con evidencias de disolución parcial de sus testas: 1) *Virgulinitella fragilis*. 2) *Nonionella auris*. 3) *Ammonia* sp. Las flechas señalan las cámaras de las testas afectadas por la disolución.

