

## Modificações nas propriedades físico-químicas de sedimentos de manguezais submetidos ao clima amazônico

### Changes in physicochemical properties of mangrove sediments under Amazonian climatic regime

José Francisco Berrêdo<sup>I</sup>, Marcondes Lima da Costa<sup>II</sup>, Maria do Socorro P. Vilhena<sup>III</sup>, Christiene R. L. Matos<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Museu Paraense Emílio Goeldi/MCTIC. Belém, Pará, Brasil

<sup>II</sup>Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil

<sup>III</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia. Tomé Açu, Pará, Brasil

**Resumo:** A contínua e progressiva maturação dos sedimentos de manguezal distribuídos ao longo do estuário do rio Marapanim, costa nordeste do estado do Pará, foi descrita com base nas propriedades físico-químicas (pH, Eh e salinidade intersticial), com o objetivo de demonstrar a influência das curtas, porém marcantes, oscilações do clima nesse setor da costa paraense. Os padrões de salinidade resultaram de fluxos superficiais, concentrados por processos de evapotranspiração, diluídos pelas marés e pelas fortes e prolongadas chuvas da região. Condições redutoras ( $-200 < Eh < -400$  mV) estabeleceram-se em terrenos mais baixos, argilosos e ricos em matéria orgânica. Em contraposição, os períodos de estiagem promoveram a oxidação e a dessecação dos sedimentos topograficamente mais elevados, originando a diminuição do pH (3,5 a 4,5) e relações inversas entre o Eh e o pH. As variações dos gradientes físico-químicos estão em estreita associação com o clima, com os ciclos das marés e com a circulação das águas intersticiais, determinando o grau de desenvolvimento e de diferenciação vertical e lateral dos sedimentos e a distribuição da vegetação no estuário.

**Palavras-chave:** Mudanças sazonais. Trocas de maré. Salinidade. Potencial redox. pH.

**Abstract:** The continuous and progressive maturation of mangrove sediments distributed along the estuary of the Marapanim River on the northeastern coast of Pará state was described based on their physicochemical properties (pH, Eh, and interstitial salinity), in order to demonstrate the influence of short but remarkable climate fluctuations on that sector of the Pará coast. Salinity patterns resulted from surface fluxes, concentrated by evaporation processes, diluted by the tides and the strong and prolonged rains in the region. Reducing conditions ( $-200 < Eh < -400$  mV) are found in lower sediments, clayey, and rich in organic matter. In contrast, periods of drought have promoted oxidation and desiccation of the topographically higher sediment, resulting in a decrease of pH (3.5 to 4.5), and inverse relations between Eh and pH. The changes in physical and chemical gradients are in close association with the climate, the cycle of the tides, the movement of interstitial water, determining the degree of development and vertical and lateral differentiation of sediment and the distribution of vegetation in estuary.

**Keywords:** Seasonal changes. Tidal changes. Salinity. Redox potential. pH.

---

BERRÊDO, J. F., M. L. COSTA, M. S. P. VILHENA & C. R. L. MATOS, 2017. Modificações nas propriedades físico-químicas de sedimentos de manguezais submetidos ao clima amazônico. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* 11(3): 313-328.

Autor de correspondência: José Francisco Berrêdo. Museu Paraense Emílio Goeldi/MCTIC. Av Perimetral, 1901 – Terra Firme. Belém, PA, Brasil. CEP 66077-530 (berredo@museu-goeldi).

Recebido em 26/01/2015

Aprovado em 06/03/2017

Responsabilidade editorial: Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo e Rogério Rosa da Silva



## INTRODUÇÃO

Os manguezais são florestas costeiras que apresentam vegetação com capacidade para sobreviver em ambientes que variam sazonalmente de salobros a espaços com condições hipersalinas (Tomlinson, 1986; Menezes *et al.*, 2008; Nguyen *et al.*, 2015). As espécies de manguezal são diferencialmente distribuídas ao longo de gradientes (salinidade, pH, Eh), os quais variam no tempo e no espaço. Outros parâmetros que podem influenciar na ocorrência e na distribuição de espécies de mangue são a geomorfologia costeira, a temperatura, o vento, a frequência das marés, a disponibilidade de água doce e os tipos de solo e de terreno (Marius & Lucas, 1991; Hogueane *et al.*, 1999; Selvam, 2003; McKee *et al.*, 2007; Nguyen *et al.*, 2015).

Nos estuários da região Norte do Brasil, a intrusão da água do mar pode originar uma cunha salina, intersticial nos sedimentos, que se desenvolve próxima e obliquamente à superfície do terreno. Sob a influência das altas taxas pluviométricas, características do clima tropical úmido, a cunha salina é diluída pelas águas pluviais e de subsuperfície, que se infiltram lentamente no sedimento pouco permeável durante as marés baixas (Duchaufour, 1988). No período de estiagem, fortes processos de evapotranspiração provocam o movimento capilar da água intersticial e a concentração da cunha salina próxima à superfície do terreno (Duchaufour, 1988; Berrêdo *et al.*, 2008b).

O demorado deslocamento das águas intersticiais por sedimentos – com diferentes granulometrias e graus topográficos, diferente composição química e teores variados de matéria orgânica, associada às curtas, porém marcantes, variações do clima – determina diferentes gradientes de pH e Eh (mV), podendo gerar degradação e precipitação mineral, que se refletem na composição química destas águas intersticiais e definem a evolução dos sedimentos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi descrever a contínua e progressiva maturação dos sedimentos lamosos do estuário do rio Marapanim,

baseado em diferentes gradientes de salinidade intersticial, pH e Eh (mV), que se desenvolvem a partir do domínio marinho em direção à terra firme e determinam o seu grau de desenvolvimento e a sua diferenciação vertical e lateral.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

O estuário do rio Marapanim está localizado na costa nordeste do estado do Pará, a leste da desembocadura do rio Amazonas, limitado pelas coordenadas 00° 32' 30" S/ 00° 52' 30" S e 47° 28' 45" W/47° 45' 00" W (Figura 1). A área costeira é influenciada pelas circulações atmosférica e oceânica, e pela descarga hídrica e sedimentar do rio Amazonas (Prost, 1997). As principais espécies de vegetação de manguezais são representadas por *Rhizophora mangle* L., *Avicennia germinans* L. e *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn. (Prost, 1997).

O clima é tropical úmido (com até 3.000 mm anuais), quente (com média de 27,7 °C) e chuvoso (com média anual entre 80 e 85%), associado ao regime de chuvas (Martorano *et al.*, 1993), sujeito a macromarés semidiurnas (amplitude > 5 m), com a água do mar penetrando cerca de 62 km até a foz do estuário durante a estação seca e 42 km durante a chuvosa (Berrêdo, 2008a). A região é influenciada pela Zona Intertropical de Convergência (ZCIT), que determina as maiores quantidades de chuva entre os meses de janeiro a junho, e as menores precipitações entre julho a dezembro (INMET, 2017). Como consequência, o rio Marapanim é altamente sazonal, contribuindo com grande quantidade de sedimentos e de água doce durante os períodos mais chuvosos. Na estiagem, a salinidade mais alta das águas superficiais é de 35 na foz, diminuindo sensivelmente rio acima (Berrêdo *et al.*, 2008b).

### PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM

A análise da rede de drenagem foi realizada a partir da interpretação de imagens Landsat (de 2001), pertencentes ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), e por meio de

fotografias aéreas (1:70.000), pertencentes à Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM). A seleção das áreas de trabalho baseou-se na interpretação da rede de drenagem, nos aspectos morfológicos e na distribuição da vegetação. Foram escolhidos dois setores para amostragem

de sedimentos: o setor A, localizado ao norte da cidade de Marapanim, e o setor B, localizado rio acima, ao sul. Neles, foram definidos três transectos: setor A (transectos I e II) e setor B (transecto IV), nivelados topograficamente de forma automática (Figura 1).

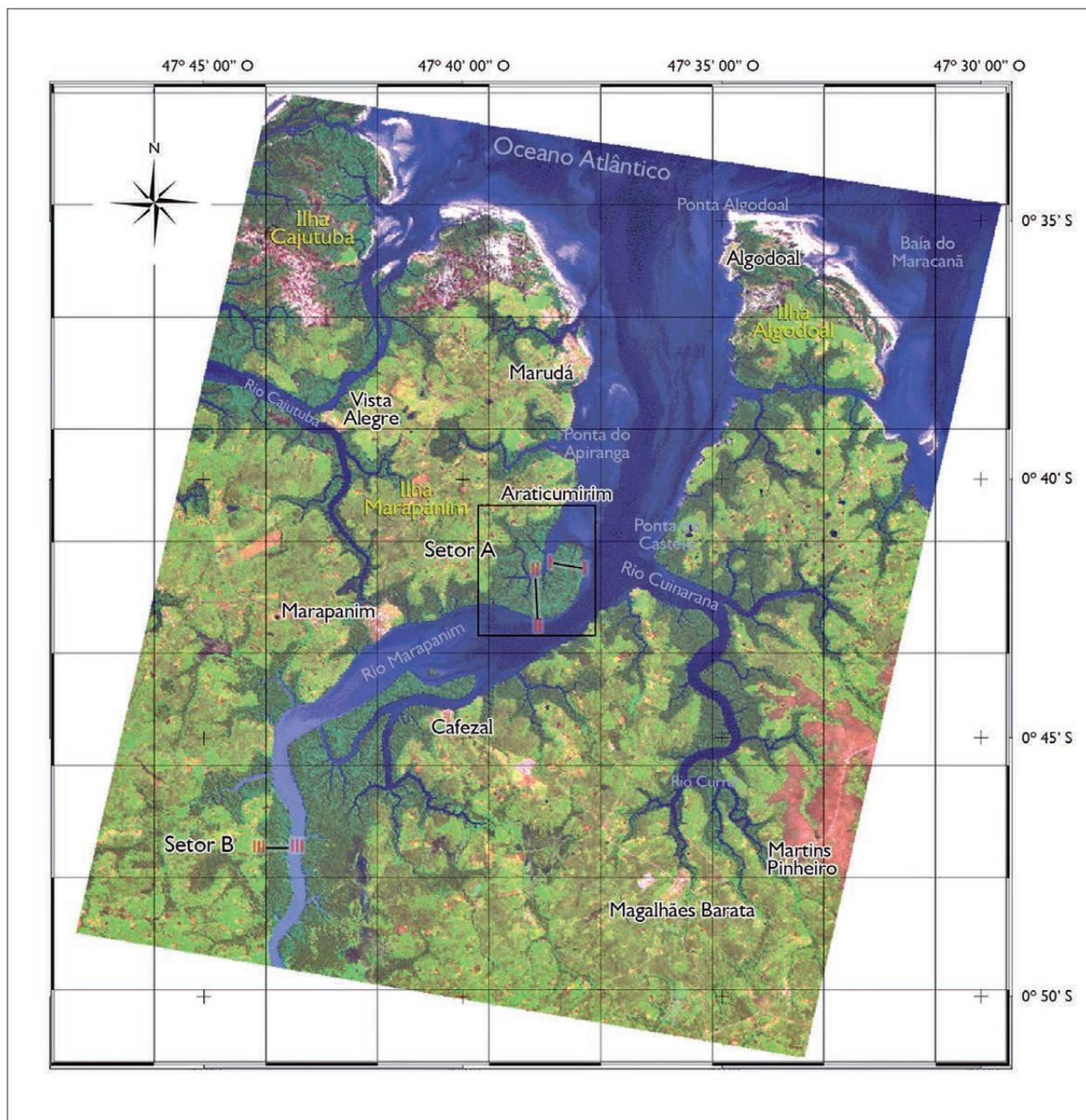


Figura 1. Mapa de localização dos pontos de amostragens.



As amostras de sedimentos foram coletadas ao longo de transectos (I, II e III). Foram coletados 60 testemunhos de sedimentos, distantes 100 m, em intervalos de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, utilizando-se um testemunhador de metal. As amostras foram coletadas aos finais do período chuvoso (junho) e de estiagem (novembro). A salinidade intersticial foi medida com um refratômetro manual (ATAGO); as medições de pH e Eh (mV) foram realizadas com um equipamento da marca Metrom 744, com a inserção do eletrodo de vidro de pH e do eletrodo de platina (Eh), diretamente no sedimento. O eletrodo de pH foi calibrado com soluções-padrão de pH 4 e 7 (escala NIST), e os sulfetos, que aderem ao eletrodo de platina, retirados com uma lixa extremamente fina, para não danificar o metal (Garrels & Christ, 1965).

## ANÁLISES NOS SEDIMENTOS

Análises granulométricas: as frações areia e argila foram separadas e determinadas quantitativamente, por método de peneiramento a via úmida, em peneira de 0,062 mm, para retirada da fração areia. Em seguida, a fração silte foi separada da fração argila sob centrifugação em 1.000 rpm. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Sedimentologia do Centro de Geociências, da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Determinação da matéria orgânica (%C): foi realizada em amostras secas, a temperatura ambiente (28 °C), por via úmida, segundo metodologia desenvolvida por Loring & Rantala (1992), para sedimentos marinhos argilosos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### A SALINIDADE INTERSTICIAL

A evolução dos sedimentos costeiros associados aos manguezais está condicionada à evolução morfológica desses ecossistemas, com suas condições hidrológicas, incluindo o desenvolvimento e a composição da cunha salina, fatores, em grande parte, regidos pelo clima e pela frequência de inundação das marés (Baltzer, 1982; Baltzer

*et al.*, 1995; Turenne, 1997). Os resultados obtidos por esses autores constituem a base para que seja descrita a contínua e progressiva maturação dos sedimentos lamosos do estuário do rio Marapanim, iniciada a partir do domínio marinho em direção à terra firme, bem como o seu grau de desenvolvimento e a sua diferenciação vertical e lateral, expressos pela salinidade intersticial, pH e Eh (mV).

A Figura 3 descreve o comportamento da cunha salina e do perfil de oxidação que se desenvolvem nos sedimentos costeiros do estuário do rio Marapanim. A linha contínua representa a oscilação da salinidade entre a estiagem e o período chuvoso, enquanto que a linha tracejada representa a amplitude da oxidação.

Um dos efeitos do clima sobre a cunha salina é a concentração ou a diluição da salinidade intersticial próxima à superfície do terreno. A curta, porém marcante, sazonalidade climática da região (notadamente precipitação pluviométrica e variações da temperatura) exerce sua influência sobre os sedimentos lamosos do estuário do rio Marapanim, registrada pela salinidade intersticial, evidenciada pelas curvas de isovalores da salinidade estabelecida entre o final do período chuvoso e a estiagem (Figura 2).

A salinidade intersticial concentra-se sob os sedimentos localizados próximo à foz do estuário, diluindo-se em direção ao continente devido às fortes vazões do rio Marapanim. A configuração assumida pelas isolinhas demonstra a influência das águas doces do rio, sugerindo o movimento intersticial (fluxos de subsuperfície) das águas estuarinas nos sedimentos (Nuttle, 1988; Nuttle & Hemond, 1988).

Sob a influência das águas do rio ou das marés, a salinidade intersticial não ultrapassa os valores máximos das águas de enchente. Por outro lado, o final do período das chuvas registra notável diluição na salinidade intersticial nos primeiros centímetros do topo dos sedimentos.

A capacidade de infiltração das águas nos sedimentos lamosos e, conseqüentemente, de diluição da água intersticial salina é aumentada pela atividade de bioturbação e por modificações na estrutura do sedimento (fendas de dessecação), provocadas pela estiagem e, secundariamente,

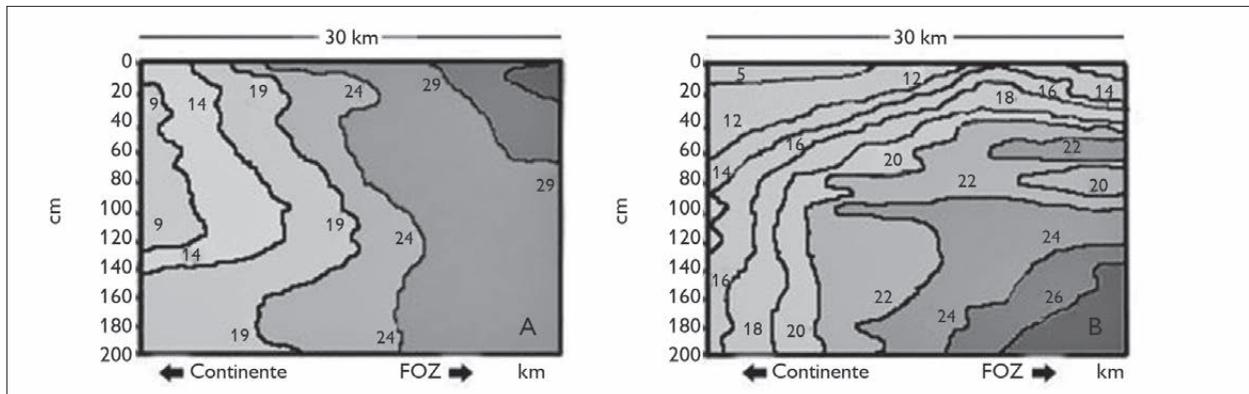


Figura 2. Distribuição da salinidade intersticial no estuário do rio Marapanim: (A) período de estiagem; (B) período chuvoso.

pela granulometria (Duchaufour, 1988). A zona de bioturbação é altamente sensível aos processos realizados na interface água-sedimento (Berner, 1980), dada sua grande heterogeneidade lateral, relacionada à distribuição das raízes e à atividade de escavação por animais (principalmente caranguejos), facilitando os transportes advectivos de águas intersticiais por correntes de marés, por oxigênio atmosférico e pela ação das variações climáticas (Aragon, 1997).

O efeito de dessalinização dos sedimentos ao longo do estuário coincide com a transição da vegetação de manguezal para zonas de águas salobras ou doces, tipificadas por espécies de várzea e de manguezal. As espécies *Acrostichum aureum* L. e *Euterpe oleracea* Mart., além de *Rhizophora* sp., e *Avicennia* sp apresentam acentuado grau de senescência. Elas constituem bosques mistos, localizados sobre sedimentos siltyco-arenosos. Esse comportamento também foi descrito por Wolanski *et al.* (1997) e Duke *et al.* (1998), e é devido, sobretudo, aos processos hidrossedimentares do rio Marapanim, que também influenciam os valores de salinidade e a implantação da vegetação de manguezais no estuário.

A região de menor salinidade atua como um tampão entre os manguezais e o curso mais elevado do rio Marapanim, sendo influenciada pela hidrologia de subsuperfície, com reconhecida importância ecológica e participação na geração do fluxo de nutrientes nesta parte

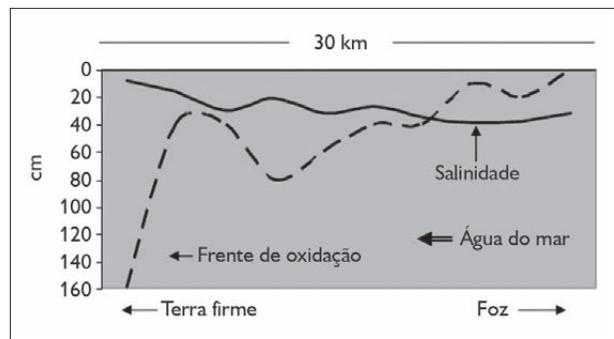


Figura 3. Representação da cunha salina e frente de oxidação nos sedimentos do estuário do rio Marapanim.

do estuário (Harvey & Odum, 1990; Santos *et al.*, 1997; Thibodeau *et al.*, 1998). Por outro lado, o condicionamento da vegetação às características morfossedimentares e à variação espacial dos parâmetros físico-químicos sugere a existência de interações efetivas entre os meios biótico e abiótico, adaptados ao regime de macromarés.

Nas amostragens realizadas ao longo do estuário, as variações dos parâmetros físico-químicos apenas demonstram relações generalizadas com a morfologia do estuário, sua declividade em relação à foz, o clima e a inundação pelas marés. Nos transectos realizados nos setores A e B, porém, medidas contínuas obtidas sobre um levantamento topográfico detalhado evidenciam as relações espaciais intrínsecas entre as variáveis climáticas (pluviometria e temperatura) e físico-químicas (salinidade, pH e Eh) com a morfologia e as variações da maré (Figuras 4 a 9).

Nas proximidades da foz do rio Marapanim, no setor A, a contribuição das águas doces do rio é menor, e a cunha salina é diluída superficialmente pelas águas das chuvas e das marés de enchente. O predomínio das águas salgadas circulando na superfície e nos interstícios dos poros dos sedimentos reflete a marcante sazonalidade da região, observada ao final da estiagem.

Nos transectos I e II (Figuras 4 a 7), os efeitos da estiagem (intensificada pela evapotranspiração) sobre o aumento da salinidade intersticial são assinalados nas áreas hachuradas dos gráficos, e delimitam regiões cujas concentrações atingiram valores acima da salinidade máxima (33) das águas de superfície no período de amostragem. Reflexos das oscilações climáticas são observados na superfície dos sedimentos, através da disposição das isolinhas de salinidade nessa região das figuras, realçado no transecto II.

Os efeitos da evapotranspiração são mais intensos nas áreas circunvizinhas aos pontos topograficamente mais elevados dos perfis, com valores de salinidade atingindo 44, no transecto I, e 40, no transecto II. Se considerarmos a salinidade máxima das águas de enchente para essa região, valores acima de 40 representam hipersalinidade. Esse valor foi tomado como base comparativa para extremos da salinidade, também adotado por Santos *et al.* (1997), para interpretar a zonação e o *stress* de salinidade sobre a vegetação de manguezais no Maranhão.

Vale ressaltar que valores de hipersalinidade não deveriam ocorrer nesta zona do baixo estuário (Santos *et al.*, 1997), tendo em vista a inundação diária dos manguezais pelas macromarés de sizígia. Ainda assim, nos limites laterais do setor A, em contato imediato com os sedimentos de terra firme (Formação Barreiras), foram registrados valores de salinidade em torno de 60, ao final do período de estiagem.

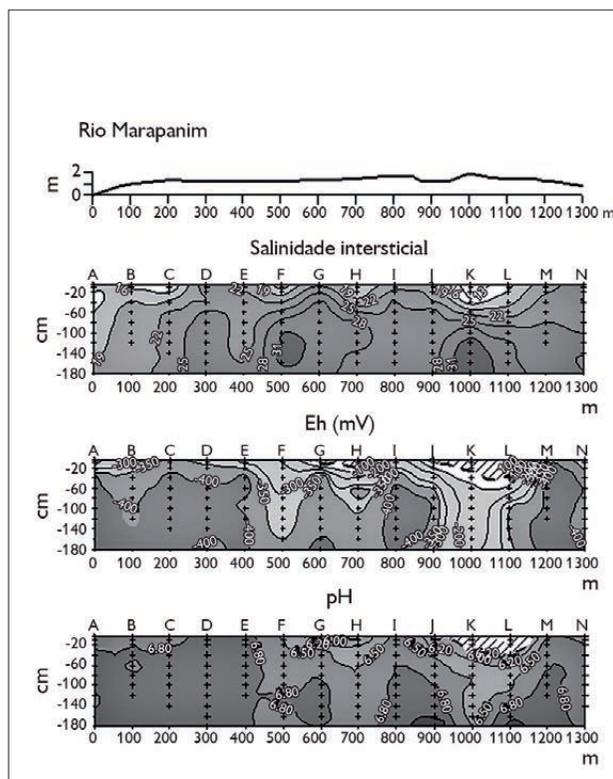


Figura 4. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período chuvoso (junho).

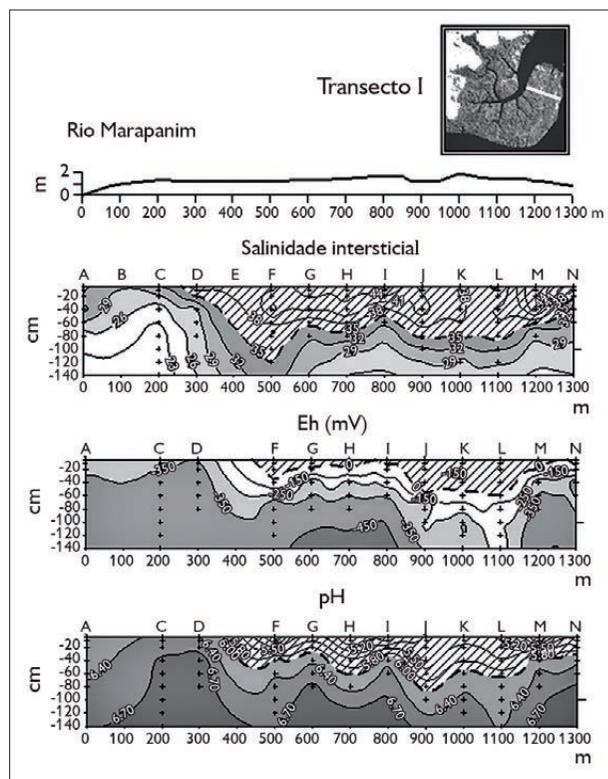


Figura 5. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período de estiagem (novembro).

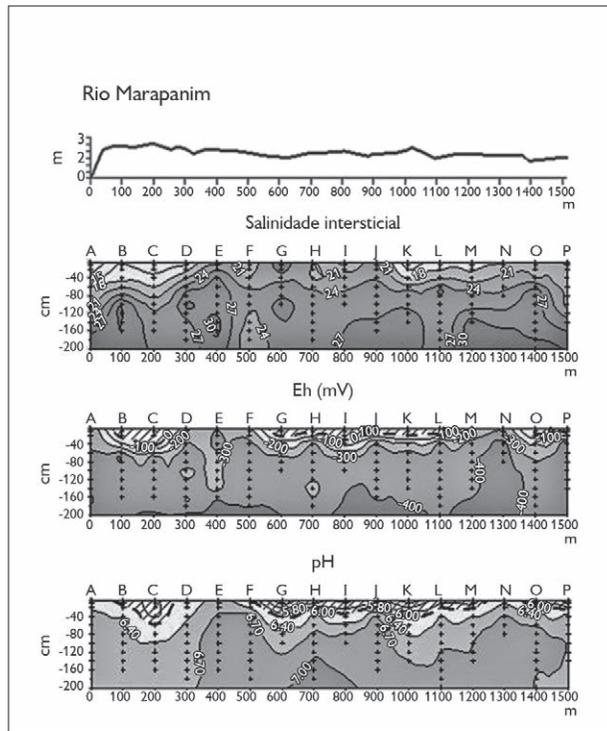


Figura 6. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período chuvoso (junho).

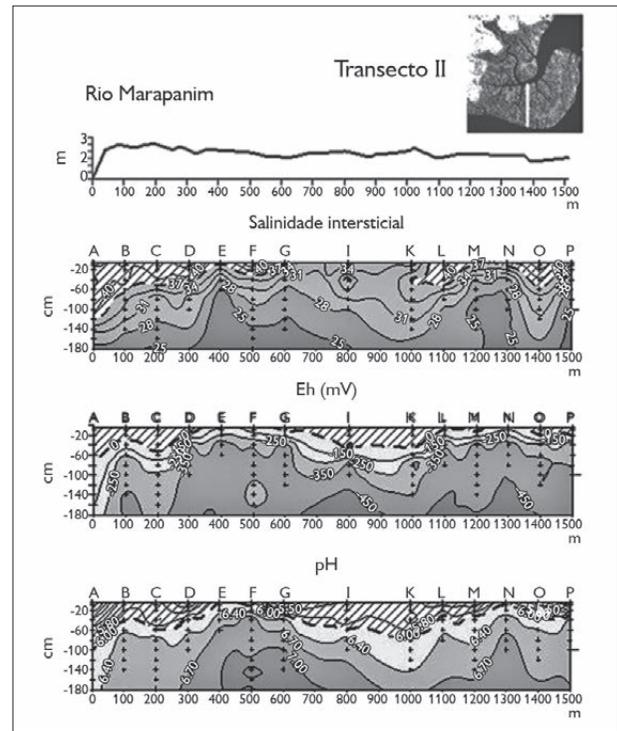


Figura 7. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período de estiagem (novembro).

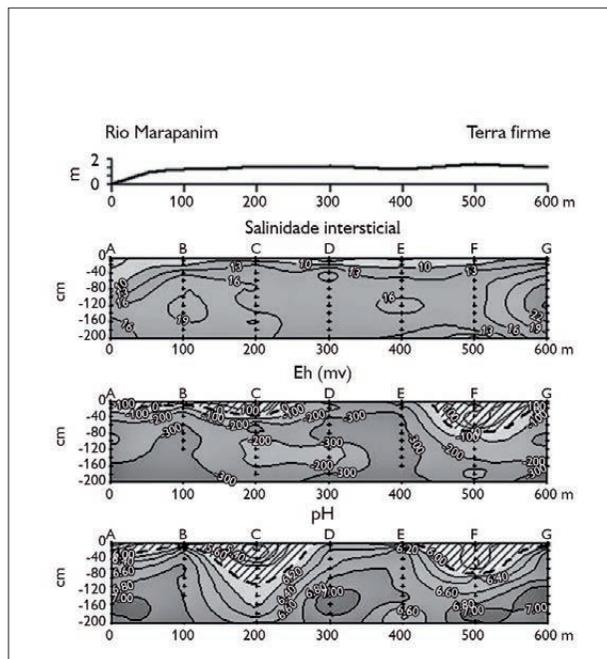


Figura 8. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período chuvoso (junho).

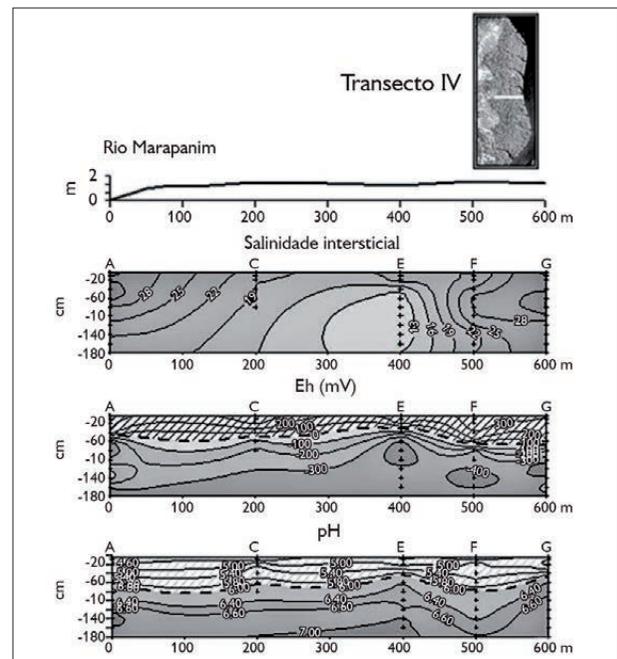


Figura 9. Distribuição da salinidade intersticial, Eh (mV) e pH no final do período de estiagem (novembro).

No setor B, localizado na zona de maior influência fluvial, existem fluxos de água doce em contato com a terra firme, ocorrendo a diluição da salinidade na superfície dos sedimentos durante o período chuvoso (Figuras 8 e 9). No transecto IV, representativo dessa região, a salinidade intersticial mais elevada é de 28, registrada na estiagem em sedimentos situados próximo ao rio Marapanim e a áreas mais elevadas em contato com a terra firme, enquanto que a salinidade máxima nas águas de superfície é de 19 no ápice da estiagem.

Importante modificação físico-química provocada pelas variações climáticas sobre os sedimentos é registrada pela repartição sazonal da salinidade intersticial, a qual representa as diferenciações vertical e lateral sofridas pela água intersticial, quando submetida a intensos processos de evaporação. Tais processos são responsáveis pela formação e pelo acúmulo de sais (principalmente gipso e halita), via difusão aquosa, próximo à superfície do sedimento. Isso é demonstrado pelo afunilamento e pelo aprofundamento das curvas, aparentemente assinalando momento harmônico dos fluxos difusivos de subsuperfície (Figura 10).

A curta variação do clima provoca a repartição nos valores da salinidade intersticial até aproximadamente 1 m. Essa também é a região de bioturbação provocada pelas raízes mais profundas, e onde ocorrem misturas dispersivas

com as águas de superfície (Harvey & Odum, 1990). Nessa profundidade, a salinidade mais elevada resulta dos processos de dessecação da água intersticial (Dacey & Howes, 1984). Logo abaixo, a salinidade tende a se estabilizar, assumindo um aspecto conservativo (Figura 10), também demonstrado pelas configurações das isolinhas de distribuição da salinidade intersticial.

A evolução sazonal da salinidade e a sua distribuição nos sedimentos são realçadas a partir dos quocientes entre o valor da salinidade no período de estiagem e a salinidade no período chuvoso (Figura 11).

Nos transectos I e II, o fator de concentração salina situa-se entre 2 e 3, nas áreas mais elevadas, e abaixo de 2, nas regiões mais deprimidas e constantemente inundadas pelas marés. Os maiores valores de concentração aparecem em íntima associação com os pontos mais elevados do terreno, demonstrando o efeito positivo da morfologia sobre a evaporação superficial dos sedimentos. Nos manguezais da Guiana Francesa, sob clima equatorial típico, Marchand *et al.* (2004) encontraram, na estiagem, concentrações de salinidade cinco vezes maior em relação às da estação chuvosa.

A existência de fatores maiores que 2 e menores ou iguais a 5, encontrados nos extremos mais elevados do transecto III, no setor B (Figura 12), corrobora a ideia

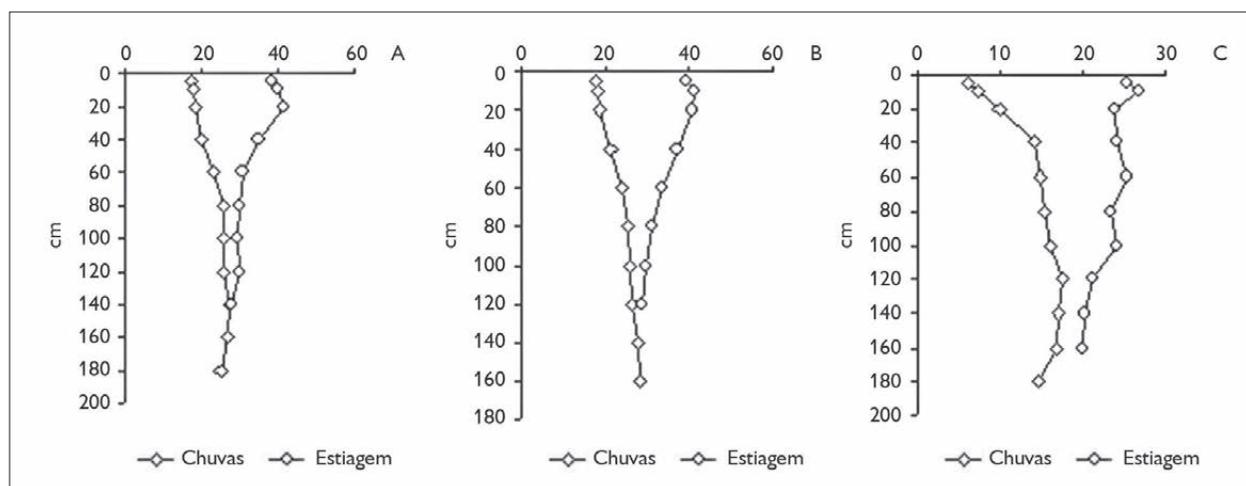


Figura 10. Variações médias da salinidade intersticial entre o período chuvoso e de estiagem: A) transecto I; B) transecto II; C) transecto III.

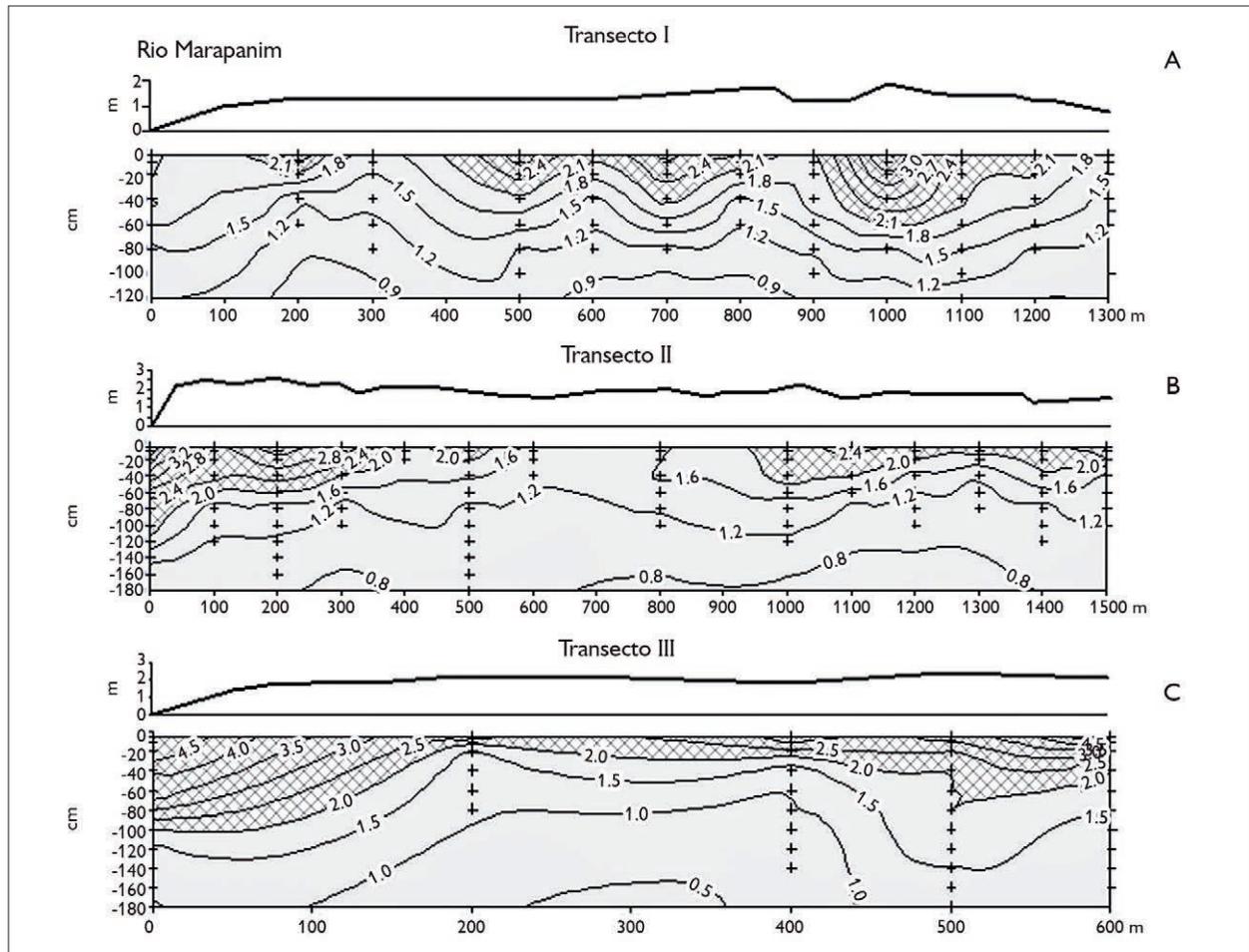


Figura 11. Fatores de concentração salina obtidos entre o período chuvoso e a estiagem.

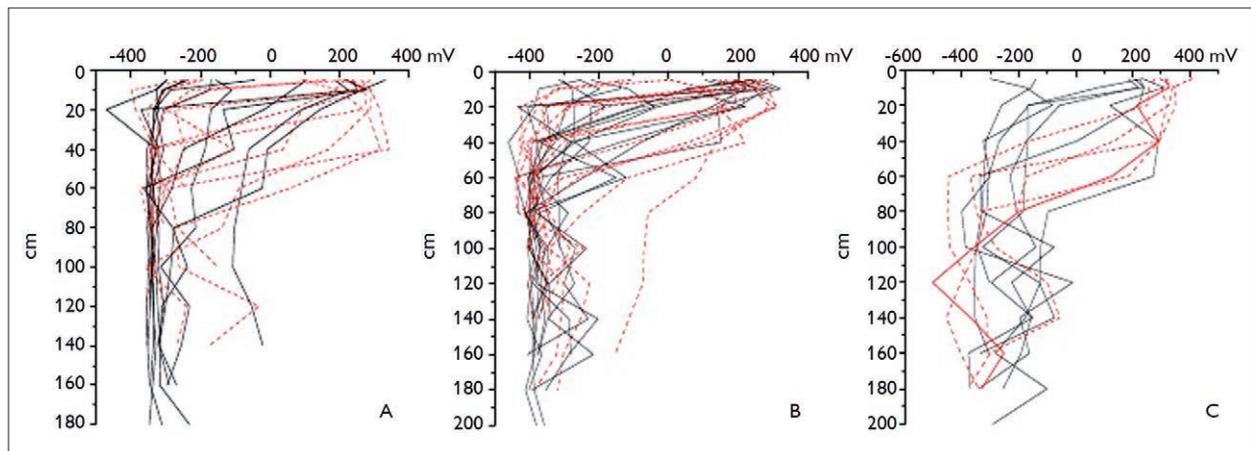


Figura 12. Distribuição dos valores de Eh (mV) nos sedimentos dos setores A (A e B) e B (C). As linhas de cor preta representam medidas do período chuvoso e as linhas tracejadas, em vermelho, medidas realizadas no final do período seco.

da influência da morfologia e da evapotranspiração (Sam & Ridd, 1998; Marchand *et al.*, 2004) sobre o desenvolvimento da salinidade no estuário do rio Marapanim. Secundariamente, é provável que a distribuição granulométrica mais grosseira, ao longo do estuário, em muito contribua para o aumento da porosidade dos sedimentos do setor B, proporcionando maior permeabilidade e exposição aos fatores atmosféricos.

A salinidade aumenta com a evolução do manguezal, sugerindo a influência da vegetação sobre o desenvolvimento dos sedimentos, aspecto também observado por Baltzer (1982) e Marchand *et al.* (2004). No transecto I do setor A, a salinidade intersticial aumenta lateralmente a partir dos terrenos mais jovens (diariamente submersos) em direção a terrenos mais elevados, quimicamente bem desenvolvidos, colonizados por vegetação mais madura, distribuída em densos e mistos bosques de *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinans*. No transecto II, com terrenos mais antigos do que o transecto I, observa-se a diluição da salinidade em zonas topograficamente deprimidas, como ocorre na região do marco de 600 m, constantemente invadida pelas marés de enchente e colonizada exclusivamente por *Rhizophora mangle*.

No setor B (transecto III), o intervalo de 300 a 450 m delimita uma área levemente rebaixada, de bosques abertos, sob domínio de *Rhizophora mangle*. Nesse local, é muito bem caracterizada a diluição da salinidade intersticial por fluxos de águas superficiais, identificando-se uma região com características salobras, situada entre níveis mais elevados de salinidade, os quais correspondem a zonas topográficas mais altas.

Os fatores hidrológicos (eles mesmos dependentes do clima), em associação com a morfologia e a frequência de inundação, desempenham importante função como reguladores do desenvolvimento da salinidade (Santos *et al.*, 1997) no estuário do rio Marapanim. Observou-se, por exemplo, que nos lugares sob inundação frequente (duas vezes ao dia) a salinidade intersticial mantém-se muito

próxima da salinidade das águas de inundação (Baltzer, 1982; Santos *et al.*, 1997).

A diluição de sais pelas marés é menos intensa do que a provocada pelas fortes e duradouras chuvas da região, principal fator externo de controle do desenvolvimento da salinidade intersticial (Leeuw *et al.*, 1991), ao lado dos fluxos de subsuperfície nos contatos com a terra firme. Esses últimos fatores equilibram o balanço de sais nas zonas limítrofes aos manguezais, impedindo o desenvolvimento de hipersalinidade permanente.

Importante ressaltar a influência que o menor alcance das marés de quadratura (área de inundação) exerce sobre as áreas mais elevadas dos manguezais, aumentando o tempo de exposição dos sedimentos aos fatores atmosféricos (cerca de cinco dias), o que é observado até mesmo em algumas áreas mais baixas, drenadas por canais de maré. O efeito da ausência das marés sobre os manguezais é potencializado na estiagem, devido à menor descarga do rio, constituindo-se em mais um importante fator para o desenvolvimento de regiões salinas a hipersalinas durante o período de ausência das chuvas, ao lado dos gradientes topográficos.

Em resumo, os padrões de salinidade que se desenvolvem nos sedimentos do estuário do rio Marapanim resultam, em grande parte, de fluxos superficiais (e de subsuperfície), da lenta circulação da água intersticial e da sua concentração próximo à superfície do terreno, da evapotranspiração associada ao desenvolvimento dos manguezais e da sazonalidade climática da região. Os processos de concentração de sais são intensificados pelo incremento da topografia, enquanto a diluição associa-se ao ritmo (e ao alcance) das marés, bem como à intensa pluviometria da região.

## POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH) E POTENCIAL REDOX (EH)

Nos manguezais do rio Marapanim, na parte superior dos sedimentos (0 a 60 cm), os valores de Eh são bastante sensíveis às mudanças sazonais, variando de 0 a +200 mV,

no final do período chuvoso, e de 0 a +400 mV, no final da estiagem (Figura 12). Abaixo dessa profundidade, na zona de redução ( $Eh < 0$ ), as medições tendem a ficar estáveis, entre 0 a -450 mV, observando-se o deslocamento das medidas para  $Eh = -400$  mV, no setor A, e entre -200 e -400 mV, no setor B. Em sedimentos lamosos da Guiana Francesa, Marchand *et al.* (2004) registraram variações de  $Eh$  entre 0 a +450 mV (em bosque de *Avicennia germinans*), ao longo da profundidade de 1 m, estabilizando entre +50 e +100 mV, dependendo da idade do manguezal e do período sazonal da amostragem.

As condições oxidantes ( $Eh > 0$ ) foram delimitadas nos gráficos para representar os desenvolvimentos vertical e lateral deste parâmetro, entre o final do período chuvoso e a estiagem (Figuras 4 a 9). As variações de  $Eh$  (mV) são notáveis nos limites da zona de bioturbação (até 1 m de profundidade), com destaque para as medidas realizadas na estiagem, em sedimentos expostos constantemente aos fatores atmosféricos (temperatura, umidade, oxigênio, chuvas, ventos etc.). Sob essas condições, o perfil de oxidação aprofunda-se nas áreas topograficamente elevadas, acompanhando nitidamente os gradientes topográficos e o desenvolvimento da salinidade intersticial em períodos de estiagem (por exemplo, no transecto I) (Figuras 4 e 5).

A vegetação também representa importante papel como agente oxidante da rizosfera, a despeito desses manguezais serem periodicamente inundados por água das marés, rica em oxigênio, que interage com as camadas superiores dos sedimentos através de orifícios e de fendas de dessecação ou por meio de exposição subaérea (Berner, 1980; Aller, 1994). A afirmativa apoia-se na seção do transecto I, com sedimentos fortemente redutores, diariamente submersos, colonizados por *Rhizophora mangle*; na sequência lateral, sob bosques mistos e densos (*Rhizophora mangle* + *Avicennia germinans*), os sedimentos tornam-se progressivamente mais oxidados, associados a manguezais maduros, sugerindo-se, por este motivo, a participação das raízes de *Avicennia germinans* na liberação de oxigênio para a oxidação dos sedimentos.

A capacidade que *Avicennia germinans* tem de oxidar os sedimentos é citada por Thibodeau & Nickerson (1986), Alongi *et al.* (2000) e Marchand *et al.* (2004). Thibodeau & Nickerson (1986) observaram expressivas rizosferas associadas às raízes da *Avicennia* sp., enquanto Alongi *et al.* (2000) verificaram que a *Avicennia* sp. libera mais oxigênio do que a *Rhizophora* sp., contribuindo com 80% da oxidação de carbono em sedimentos com floresta de *Avicennia* sp. Por outro lado, Marchand *et al.* (2004) não observaram efeitos de oxidação nos sedimentos colonizados por *Rhizophora* sp., o que realça os resultados apresentados.

A zona de oxidação apresenta sempre o menor teor em carbono orgânico (1,5 a 2%) na superfície dos sedimentos (até 60 cm), fato observado tanto na parte externa de manguezais mais antigos, situados perto do rio Marapanim (transectos II e III), quanto na zona mais interna, com valores de  $Eh$  entre 0 e +200 mV (Figura 13). Próximas ao contato com os sedimentos de terra firme, de granulometria mais grosseira (por exemplo, no transecto III), a oxidação ( $0 < Eh < 400$  mV) e a dessecação extremas reduzem os teores de carbono orgânico a 0,75% em superfície, embora esses teores aumentem até 1,75% em profundidade (até 2 m). Os efeitos do clima são marcados na zona de oxidação pela mineralogia, associada aos processos de exposição aérea dos sedimentos e de flutuação vertical da água intersticial, ocasionando a precipitação de óxidos de ferro, a oxidação de sulfetos e a formação de jarosita, sais de halita e gipso (Berrêdo *et al.*, 2008a).

As condições mais redutoras estão geralmente associadas a manguezais mais antigos e ricos em carbono orgânico (Marchand *et al.*, 2003), tipicamente exemplificado no transecto II, cujos sedimentos com teores mais baixos em carbono orgânico (1,75 a 2,3%) e  $Eh$  entre -300 a -400 mV passam gradativamente a terrenos com  $Eh$  em torno de -400 mV, associados com concentrações de carbono orgânico variando entre 2 a 3,5% (Figura 13).

Experimentos com o fracionamento de carbono orgânico, nesse perfil, evidenciaram o aumento dos ácidos fúlvicos (AF) vertical e lateralmente (272,8 a 861,7 g.kg<sup>-1</sup>)

em direção aos terrenos mais antigos, associados a teores de ácidos húmicos (AH) variando entre 2,71 a 29,9 g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Costa *et al.*, 2004). Os teores de ácidos fúlvicos são sempre mais elevados do que os de ácidos húmicos, com razão AF/AH > 1. A presença de ácidos húmicos é característica de processos oxidativos continuados (Demétrio, 1988), com concentrações mais elevadas na superfície oxidada, provavelmente refletindo a maturação desses sedimentos.

Localmente, porém, na zona de sedimentos jovens do transecto I, existem concentrações elevadas de carbono orgânico (3,5%), associadas a sedimentos bastante redutores (Eh = -400 mV), colonizados por *Rhizophora mangle* em zona de acreção sedimentar. O poder redutor desses sedimentos é explicado pela fina granulometria, que condiciona a menor permeabilidade e o lento movimento das águas intersticiais, os quais favorecem os processos de decomposição da matéria

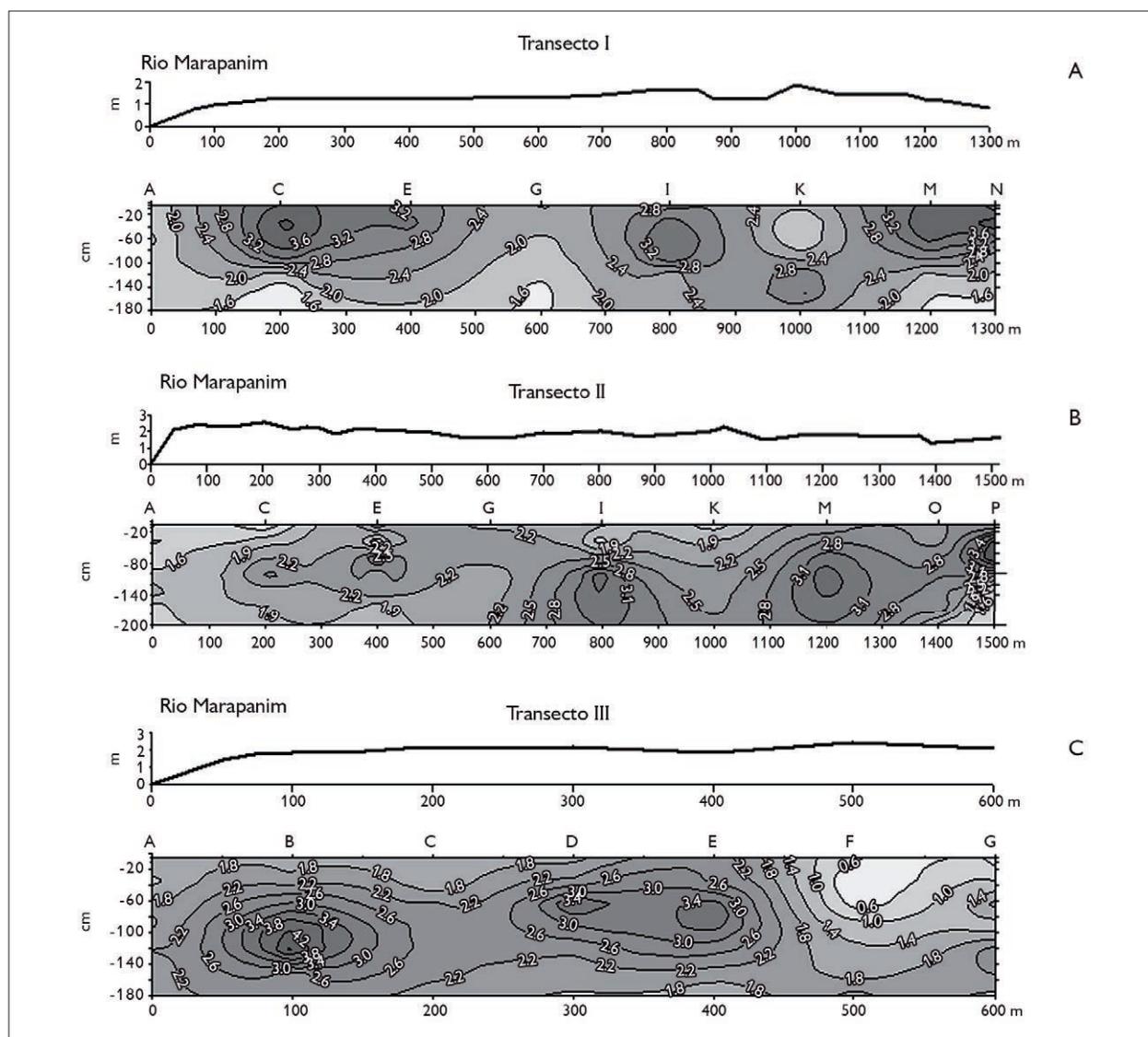


Figura 13. Distribuição dos teores de matéria orgânica (%C) nos setores A, B e C (respectivamente, transectos I, II e III).

orgânica por bactérias sulfato redutoras, confirmado pelo elevado teor de sulfetos dissolvidos e pelo aparecimento de fases mineralógicas sulfetadas ( $\text{FeS}_2$ ) (Berrêdo *et al.*, 2008b). Por outro lado, os sedimentos do transecto III, com teores aproximadamente iguais de matéria orgânica (2 a 3,3%), correspondem a condições menos redutoras, em torno de -300 mV, provavelmente influenciadas pela aeração, proporcionada pela granulometria mais grosseira e pelos intensos processos de dessecação.

O desenvolvimento geoquímico (lateral e vertical) dos sedimentos é realçado a partir da evolução dos valores de Eh (mV) observada nos três transectos obtidos ao longo do rio Marapanim. Em primeiro plano, sedimentos fortemente redutores e mediantemente oxidados do setor A (transectos I e II) cedem lugar a sedimentos menos redutores e fortemente oxidados do setor B (transecto III). Em segundo, pelo aumento gradual dos valores de Eh (mV) em direção à superfície – o que seria o óbvio, não fosse a constatação de valores menos redutores e aprofundados das isolinhas de Eh (mV) situadas abaixo de terrenos mais elevados e oxidados –, essa configuração assinala processos diagenéticos irreversíveis nesses sedimentos, favorecidos pela circulação mais rápida das águas.

Os valores de Eh (mV) confirmam o esquema de circulação das águas nos manguezais, representando papel essencial na distribuição das condições oxi-redutoras, bem como o acúmulo e a decomposição da matéria orgânica, fatores responsáveis pelo surgimento de fases sulfetadas autigênicas, representadas principalmente pela pirita. Na zona de redução, o acúmulo de matéria orgânica e o constante aporte de sulfatos pelas marés de enchente facilitam a ação bacteriana e o surgimento de elevados teores de sulfetos dissolvidos.

Os valores de pH apresentam comportamento diferenciado, com a profundidade e o período de amostragem, semelhante ao observado por Baltzer *et al.* (1995) e Marchand *et al.* (2004), nos sedimentos dos manguezais da Guiana Francesa. Na parte superior dos sedimentos (0 a 60 cm de profundidade), o pH mantém-se entre 5 e 6,5 no período úmido, estabilizando próximo a 7, em profundidade. Na estiagem, ele se torna mais ácido, atingindo valores entre 3,5 e 4, mantendo-se estável em profundidade, em torno de 7 (Figura 14).

Foi observado que as zonas de sedimentos mais oxidados possuem correspondência com as regiões de manguezais mais antigos, de pH mais ácido ( $\text{pH} < 6$ ),

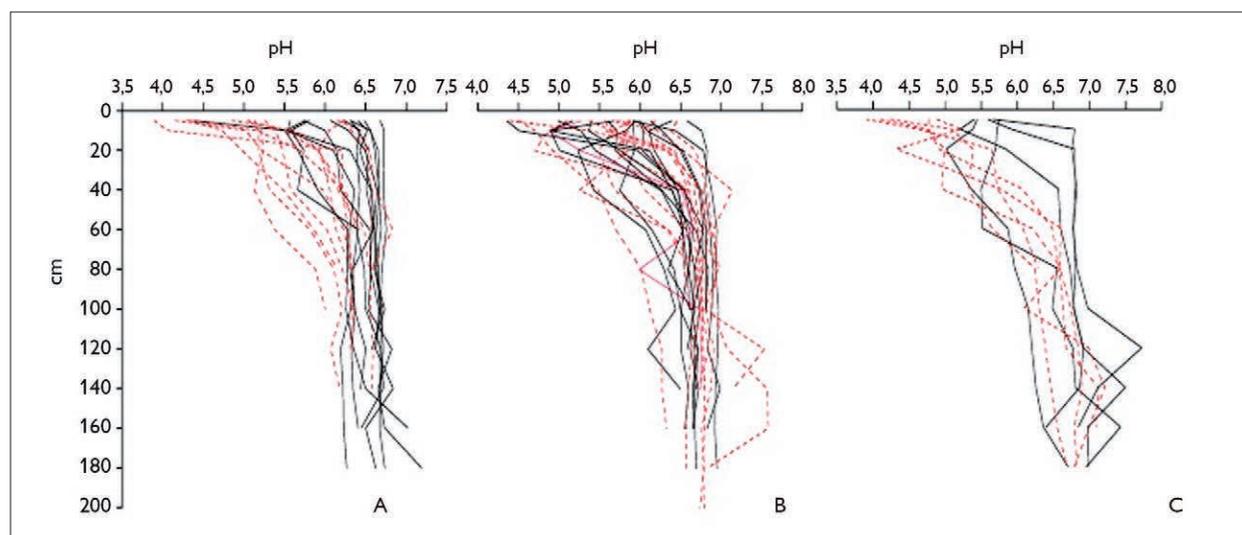


Figura 14. Distribuição dos valores de pH nos sedimentos dos setores A (A e B) e B (C). As linhas de cor preta representam medidas do período chuvoso e as tracejadas em vermelho, medidas realizadas no final do período seco.

ressaltando-se o maior abaixamento do pH no período de estiagem, nas zonas topograficamente mais altas (Figuras 4 a 9). Em zonas mais deprimidas, normalmente com maiores teores de matéria orgânica, a sulfato-redução foi acompanhada do aumento da reserva alcalina, tamponando o pH próximo à neutralidade ou tornando-o ligeiramente alcalino.

O processo de oxidação ocorre em resposta à circulação de águas ricas em substâncias oxidantes, as quais favorecem a decomposição da matéria orgânica, a oxidação de  $\Sigma\text{H}_2\text{S}$  dissolvidos e da pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Esse mineral foi identificado inalterado em profundidades a partir de 60 cm e preservado como finas partículas em zonas superiores ou morfologicamente alteradas nesta profundidade, com reflexos sobre a composição química das águas intersticiais. Nos sedimentos do setor B, a granulometria mais grosseira favorece a oxidação dos sulfetos e o desenvolvimento de sedimentos mais ácidos, principalmente na estiagem.

Durante o período de estiagem, os sedimentos são preferencialmente oxidados, demonstrados por relações inversas entre o pH e o Eh (mV) (Figura 15). A oxidação dos sedimentos pode ser influenciada pela intensidade e pela duração do período das chuvas na região costeira, porém certamente este processo é menos intenso, se comparado à ação da estiagem conjuntamente com a circulação das águas no manguezal. Semelhante às condições de desenvolvimento do Eh (mV), o pH dos sedimentos dos manguezais mostra-se influenciado pela circulação das águas, assim como pela química e pela mineralogia dos sedimentos, estreitamente condicionados aos teores de matéria orgânica.

A flutuação sazonal da água intersticial permite extrapolações concernentes aos processos de oxi-redução e acidificação dos sedimentos. Quando o teor de água diminui durante a estiagem, os sedimentos situados em posição mais elevada topograficamente ficam expostos. No período de chuvas intensas, o nível de água eleva-se nos sedimentos, permitindo o restabelecimento de condições redutoras, com a diminuição do Eh (mV) e com tendência à neutralização do pH.

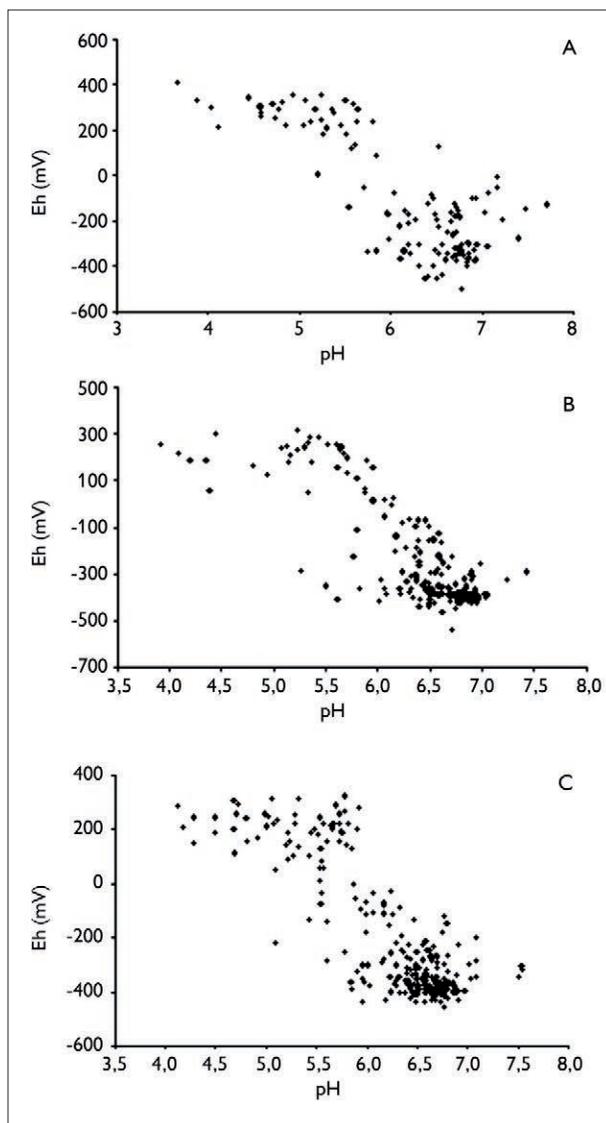


Figura 15. Variações do pH x Eh (mV) nos sedimentos de manguezais dos setores A (A e B) e B (C).

Em resumo, os condicionantes climáticos (pluviometria e temperatura) e morfológicos na área de estudo explicam o progressivo e contínuo desenvolvimento dos sedimentos lamosos e suas diferenciações, as quais, por sua vez, são intimamente dependentes do regime hídrico, da composição da água de subsuperfície e da periodicidade de inundação (além da atividade biológica). Assim, as transformações físicas (perda em água, aeração,

oxidação, estruturação) e químicas (diminuição da salinidade, lixiviação e evolução das formas químicas do ferro) dos sedimentos acontecem simultaneamente, como também observado por Turenne (1997).

## CONCLUSÕES

O desenvolvimento dos manguezais do estuário do rio Marapanim reflete-se na evolução da rede de drenagem, estando associado a padrões específicos da vegetação e ao ritmo das marés. As zonas de acreção lamosa recente, mais baixas e periodicamente inundadas pelas marés, são constituídas por sedimentos predominantemente úmidos e redutores, sobre os quais se desenvolvem incipientes canais de marés, colonizados por manguezais jovens, principalmente composto por *Rhizophora mangle*.

Nos sedimentos do estuário do rio Marapanim, o aumento da salinidade intersticial responde positivamente aos incrementos da topografia e ao clímax da estiagem; ela se desenvolve segundo gradientes que acompanham a transição dos terrenos mais jovens para os mais antigos e a implantação da vegetação. Os padrões de salinidade são transitórios, sendo resultantes de fluxos superficiais e dos movimentos da água intersticial em direção à superfície, concentrada por processos de evapotranspiração e diluída pelas marés e pelas fortes e prolongadas chuvas da região. As medições de Eh e pH confirmam a movimentação das águas intersticiais e as relações com o desenvolvimento do sedimento. Condições redutoras ( $-200 < Eh < -400$  mV) associam-se a terrenos mais baixos, argilosos, ricos em matéria orgânica, e o pH oscila entre 6,5 e 8. Em contraposição, os períodos de estiagem promovem a diminuição do pH (3,5 a 4,5) em locais topograficamente mais elevados e dessecados, de circulação mais rápida das águas, gerando relações inversas entre o Eh e o pH.

## REFERÊNCIAS

ALLER, R. C., 1994. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: effects of redox oscillation. **Chemical Geology** 114(3-4): 331-345. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90062-0).

ALONGI, D. M., F. TIRENDI & B. F. CLOUGH, 2000. Below-ground decomposition of organic matter in forests of the mangrove *Rhizophora stylosa* and *Avicennia marina* along the arid coast of Western Australia. **Aquatic Botany** 68(2): 97-122. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00110-8).

ARAGON, G. T., 1997. **Biogeoquímica sedimentar do ferro e do enxofre em um manguezal da baía de Sepetiba, RJ**: neoformação de sulfetos ferrosos: 1-119. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

BALTZER, F., 1982. La transition eau douce-eau salée dans les mangrove. Conséquences sédimentologiques et géochimiques. **Mémoires de la Société Géologique de France** 144: 27-42.

BALTZER, F., J. C. PLAZIAT, M. T. PROST & J. P. RUDANT, 1995. Long-term effects of seasonal changes on geochemical properties of sediments in mangrove swamps in French Guiana. **Workshop ECOLAB** 3: 51-54.

BERNER, R. A., 1980. **Early diagenesis**: a theoretical approach: 1-256. Princeton University Press, New Jersey.

BERRÊDO, J. F., M. L. COSTA, M. P. S. PROGENE & J. T. SANTOS, 2008a. Mineralogia e geoquímica de sedimentos de manguezais da costa amazônica: o exemplo do estuário do rio Marapanim (Pará). **Revista Brasileira de Geociências** 38(1): 24-35.

BERRÊDO, J. F., M. L. COSTA & M. P. S. PROGENE, 2008b. Efeitos das variações sazonais do clima tropical úmido sobre as águas e sedimentos de manguezais do estuário do rio Marapanim, costa nordeste do estado do Pará. **Acta Amazonica** 38(3): 473-482. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000300012>.

COSTA, M. L., H. BEHLING, J. F. BERRÊDO & N. V. M. SIQUEIRA, 2004. Mineralogical, geochemical and palynological studies of Late Holocene mangrove sediments from Northeastern Pará State, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências** 34(4): 479-488.

DACEY, J. W. H. & B. L. HOWES, 1984. Water uptake by roots controls water table movement and sediment oxidation in short *Spartina* marsh. **Science** 224(4648): 487-489. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.224.4648.487>.

DEMÉTRIO, R., 1988. **Efeito da aplicação de matéria orgânica sobre a biomassa-C microbiana do solo e o crescimento e absorção de nitrogênio em milho (*Zea mays* L.)**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

DUCHAUFOR, P., 1988. **Pédologie**: 1-224. Masson, Paris.

DUKE, N. C., M. C. BALL & J. C. ELLISON, 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. **Global Ecology and Biogeography Letters** 7(1): 27-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2997695>.

GARRELS, R. M. & C. L. CHRIST, 1965. **Solutions, minerals and equilibria**: 1-450. Harper et Row Ed., New York.



- HARVEY, J. W. & W. E. ODUM, 1990. The influence of tidal marshes on upland groundwater discharge to estuaries. **Biogeochemistry** 10(3): 217-236.
- HOGUANE, A. M., A. E. HILL, J. H. SIMPSON & D. G. BOWERS, 1999. Diurnal and tidal variation of temperature and salinity in the Ponta Rasa Mangrove Swamp, Mozambique. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 49(2): 251-264. DOI: <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0499>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET), 2017. Disponível em: <[www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)>. Acesso em: 10 janeiro 2017.
- LEEJW, J., A. VAN DEN DOOL, W. MUNCK, J. NIEUWENHUIZE & W. G. BEEFTINK, 1991. Factors influencing the soil salinity regime along a intertidal gradient. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 32(1): 87-97. DOI: [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(91\)90030-F](https://doi.org/10.1016/0272-7714(91)90030-F).
- LORING, D. H. & R. T. T. RANTALA, 1992. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. **Earth-Science e Reviews** 32: 235-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(92\)90001-A](https://doi.org/10.1016/0012-8252(92)90001-A).
- MARCHAND, C., E. LALLIER-VERGÈS & F. BALTZER, 2003. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 56(1): 119-130. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00134-8).
- MARCHAND, C., F. BALTZER, E. LALLIER-VERGÈS & P. ALBÉRIC, 2004. Pore-water chemistry in mangrove sediments: relationship with species composition and developmental stages (French Guiana). **Marine Geology** 208(2-4): 361-381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.04.015>.
- MARIUS, C. & J. LUCAS, 1991. Holocene mangrove swamps of West África sedimentology and soils. **Journal of African Earth Sciences** 12(1-2): 41-54. DOI: [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(91\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0899-5362(91)90056-5).
- MARTORANO, L. G., L. C. PEREIRA, E. G. M. CÉZAR & I. C. B. PEREIRA, 1993. **Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thorntwhite, Mather)**: 1-53. SUDAM/EMBRAPA/SNLCS, Belém.
- MCKEE, K. L., D. R. CAHOON & I. C. FELLER, 2007. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation. **Global Ecology and Biogeography** 16(5): 545-556. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00317.x>.
- MENEZES, M. P. M., U. BERGER & U. MEHLIG, 2008. Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. **Acta Amazonica** 38(3): 403-420. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000300004>.
- NGUYEN, H. T., D. E. STANTON, N. SCHMITZ, G. D. FARQUHAR & M. C. BALL, 2015. Growth responses of the mangrove *Avicennia marina* to salinity: development and function of shoot hydraulic systems require saline conditions. **Annals of Botany** 115(3): 397-407. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcu257>.
- NUTTLE, W. K., 1988. The extent of lateral water movement in the sediments of a New England Salt Marsh. **Water Resources Research** 24(12): 2077-2085. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/WR024i012p02077>.
- NUTTLE, W. K. & H. F. HEMOND, 1988. Salt marsh hidrology: implications for biogeochemical fluxes to the atmosphere and estuaries. **Global Biogeochemical Cycles** 2(2): 91-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/GB002i002p00091>.
- PROST, M. T., 1997. **Evolução atual e Holocênica do litoral do nordeste do estado do Pará**: relatório final de projeto de pesquisa: 1-80. MPEG/CNPq, Belém.
- SAM, R. & P. RIDD, 1998. Spatial variations of groundwater salinity in a mangrove-salt flat system, Cocoa Creek, Australia. **Mangroves and Salt Marshes** 2(3): 121-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009919411508>.
- SANTOS, M. C. F. V., J. C. ZIEMAN & R. R. H. COHEN, 1997. Interpreting the upper mid-littoral zonation patterns of mangroves in Maranhão (Brazil) in response to microtopography and hydrology. In: B. KJERFVE, L. D. LACERDA & E. S. DIOP (Ed.): **Mangrove ecosystem studies in Latin America and Afric**: 127-144. UNESCO, Paris.
- SELVAM, V., 2003. Environmental classification of mangrove wetlands of India. **Current Science** 84(6): 757-765.
- THIBODEAU, P. M. & N. H. NICKERSON, 1986. Differential oxidation of mangrove substrate by *Avicennia germinans* and *Rhizophora mangle*. **American Journal of Botany** 73(4): 512-516. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2444255>.
- THIBODEAU, P. M., L. R. GARDNER & H. W. REEVES, 1998. The role of groundwater flow in controlling the spatial distribution of soil salinity and rooted macrophytes in a southeastern salt marsh, USA. **Mangroves and Salt Marshes** 2(1): 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009910712539>.
- TOMLINSON, P. B., 1986. **The botany of mangroves**: 1-418. Cambridge University Press, Cambridge.
- TURENNE, J. F., 1997. **L'écosystème mangrove**: continuité et discontinuité: 1-7. Reunion ECOLAB, Cayenne.
- WOLANSKI, E., W. KING & D. GALLOWAY, 1997. Salinity intrusion in the fly river estuary, Papua New Guinea. **Journal of Coastal Research** 13(4): 993-994.

