



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n22025p253-269

Submetido em: 31 jul. 2025

ACEITO em: 13 out. 2025

.....

Monitoramento Remoto da Temperatura em Ninhos de Tartarugas Marinhas com IoT e LoRaWAN: Um Estudo de Caso na Reserva Caruara

Remote Monitoring of Temperature in Sea Turtle Nests Using IoT and LoRaWAN Technologies: A Case Study in the Caruara Reserve

Thiago Rodrigues Faria  <https://orcid.org/0009-0009-3810-102X>

Instituto Federal Fluminense

Doutorando em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos - Ambhidro pelo Instituto Federal Fluminense.

E-mail: r.thiago@gsuite.iff.edu.br

Vicente de Paulo Santos de Oliveira  <https://orcid.org/0000-0002-5981-0345>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

E-mail: vicentepsoliveira@gmail.com

Jader Lugon Junior  <https://orcid.org/0000-0001-8030-0713>

Instituto Federal Fluminense

Doutor em Modelagem Computacional (UERJ). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - campus Macaé (RJ) – Brasil.

E-mail: jader.lugon@gsuite.iff.edu.br

Thiago Moreira de Rezende Araújo  <https://orcid.org/0000-0003-2512-9743>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Ciências Naturais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Professor no Instituto Federal Fluminense.

E-mail: thiago_uenf@yahoo.com.br

Tatiane Bittar Vieira  <https://orcid.org/0000-0002-5458-0755>

Instituto Federal Fluminense

E-mail: tatiane.bittar@ipf-sf.com.br

William da Silva Vianna  <https://orcid.org/0000-0001-7180-3159>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Professor no Instituto Federal Fluminense.

E-mail: william.vianna@gsuite.iff.edu.br

Resumo: As tartarugas marinhas são extremamente importantes para os ecossistemas marinhos e costeiros, exercendo diversas funções ecológicas que auxiliam na manutenção do equilíbrio ambiental. A conservação desses animais é crucial devido às ameaças que

enfrentam, principalmente frente as mudanças climáticas. A temperatura de incubação é um fator determinante para o sexo dos filhotes, o que torna o monitoramento preciso da temperatura dos ninhos uma ferramenta fundamental para a implementação de estratégias de manejo eficazes. Este estudo apresenta um sistema de monitoramento remoto de temperatura em ninhos de tartarugas marinhas, usando IoT e LoRaWAN, implementado na Reserva Caruara em parceria com o Projeto Tamar. A finalidade foi validar a tecnologia e obter dados térmicos contínuos. O sistema monitorou um ninho por 38 dias de forma não invasiva, transmitindo e registrando dados em tempo real. Os resultados indicam a eficácia do sistema. As temperaturas variaram entre 30,5°C e 34,0°C, com baixa amplitude diária (média 0,8°C). Estes valores, situados em faixas frequentemente associadas à feminização em diversas espécies de tartarugas marinhas, sugerem alto potencial para ninhadas com predominância de fêmeas, ressaltando a importância de dados precisos para informar estratégias de manejo adaptativo.

Palavras-chave: Reserva Caruara. Tartarugas Marinhas. IoT. LoRaWAN. Monitoramento Remoto.

Abstract: Sea turtles are extremely important for marine and coastal ecosystems, performing several ecological functions that help maintain environmental balance. The conservation of these animals is crucial due to the threats they face, especially from climate change. Incubation temperature is a determining factor for the sex of the hatchlings, which makes precise monitoring of nest temperature a fundamental tool for implementing effective management strategies. This study presents a remote temperature monitoring system for sea turtle nests, using IoT and LoRaWAN, implemented at the Caruara Reserve in partnership with the Tamar Project. The purpose was to validate the technology and obtain continuous thermal data. The system monitored one nest for 38 days non-invasively, transmitting and recording data in real-time. The results indicate the system's effectiveness. Temperatures ranged from 30.5°C to 34.0°C, with a low daily amplitude (average of 0.8°C). These values, falling within ranges often associated with feminization in several sea turtle species, suggest a high potential for female-biased clutches, highlighting the importance of accurate data to inform adaptive management strategies.

Keywords: Reserva Caruara. Sea Turtles. IoT. LoRaWAN. Remote Monitoring.

1 Introdução

As tartarugas marinhas, habitantes dos oceanos há mais de 100 milhões de anos, desempenham um papel fundamental na saúde dos ecossistemas oceânicos e na manutenção da biodiversidade. No entanto, esses animais enfrentam diversas ameaças, incluindo a destruição de seus habitats de nidificação, a poluição marinha, a pesca predatória e as mudanças climáticas (Hamann et al., 2010).

Em águas brasileiras, encontram-se cinco das sete espécies de tartarugas marinhas existentes no mundo: a tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*), a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), a tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*), a tartaruga-oliva (*Lepidochelys olivacea*) e a tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*). A tartaruga-cabeçuda e a tartaruga-verde são as espécies mais comuns na costa brasileira, representando a maioria dos registros de desova e alimentação (ICMBio/TAMAR, 2018). A tartaruga-de-pente, por sua vez, é considerada uma espécie ameaçada de extinção, com poucos registros de desova no Brasil (ICMBio, 2014).

A tartaruga-oliva e a tartaruga-de-couro são espécies mais raras, com registros ocasionais de desova e alimentação em águas brasileiras (Thomé et al., 2007).

A temperatura de incubação dos ninhos é um fator crítico para o sucesso reprodutivo das tartarugas marinhas, pois determina o sexo dos filhotes através de um fenômeno conhecido como determinação sexual dependente da temperatura (TSD) (Yntema & Mrosovsky, 1982). Em geral, temperaturas mais altas produzem mais fêmeas, enquanto temperaturas mais baixas produzem mais machos. As mudanças climáticas, com o aumento das temperaturas globais, podem levar a uma feminização excessiva das populações de tartarugas marinhas, comprometendo sua viabilidade a longo prazo (Fuentes et al., 2011). Estudos recentes têm

demonstrado que o aumento da temperatura média dos oceanos pode levar a um desequilíbrio na proporção sexual das tartarugas marinhas, com um aumento significativo no número de fêmeas e uma diminuição no número de machos (Jensen et al., 2018). Essa feminização excessiva pode comprometer a capacidade das populações de tartarugas marinhas de se reproduzirem e se adaptarem às mudanças ambientais.

O monitoramento da temperatura dos ninhos é, portanto, essencial para a conservação das tartarugas marinhas. No entanto, os métodos tradicionais de monitoramento, que envolvem visitas frequentes aos ninhos para a coleta de dados, são caros, trabalhosos e podem causar perturbações aos animais (Wilson et al., 2018). Além disso, alguns equipamentos utilizados para o registro da temperatura dos ninhos, como os dataloggers, registram os dados localmente, sem acesso remoto para leitura e acompanhamento em tempo real. Essa limitação dificulta a tomada de decisões rápidas e eficientes em caso de eventos climáticos extremos, como ondas de calor ou tempestades, que podem afetar a temperatura dos ninhos e comprometer o sucesso da incubação.

Nesse contexto, o uso de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e redes de longo alcance e baixa potência (LPWAN) surge como uma alternativa promissora para o monitoramento remoto da temperatura dos ninhos de tartarugas marinhas (Batista et al., 2019). As tecnologias IoT permitem a coleta de dados de forma automatizada e em tempo real, enquanto as redes LPWAN garantem a transmissão dos dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, tornando possível o monitoramento em áreas remotas e de difícil acesso (Marques et al., 2020).

Este artigo apresenta um estudo de caso sobre o desenvolvimento de um dispositivo piloto para monitorar a temperatura em ninhos de tartarugas marinhas, implementado em parceria com o Programa de Monitoramento de Tartarugas Marinhas do Porto do Açu (PMTM).

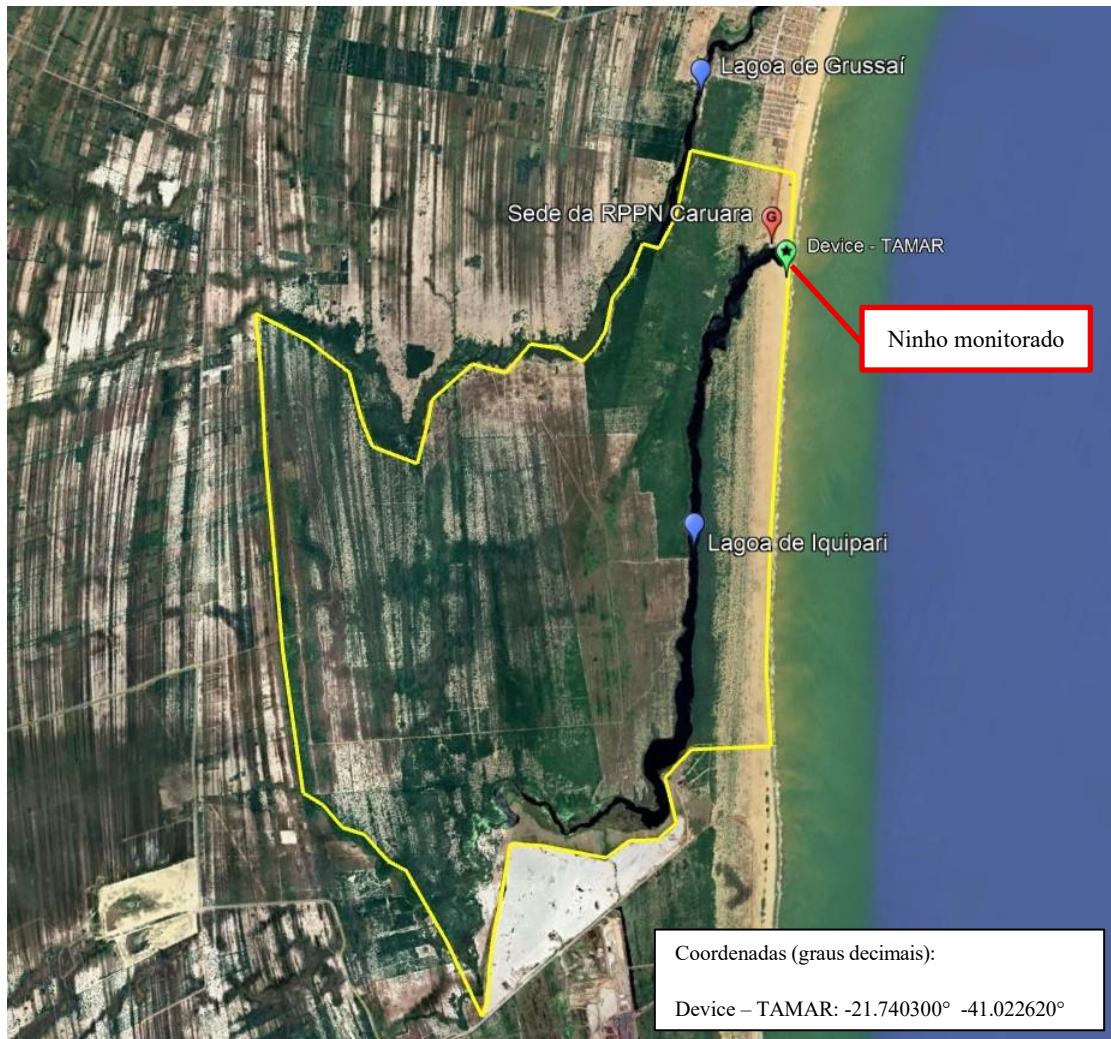
O objetivo principal deste estudo foi verificar a viabilidade e a eficácia de um sistema de monitoramento remoto baseado em IoT e LoRaWAN para a conservação de tartarugas marinhas, fornecendo dados valiosos para a gestão e a tomada de decisões.

2 Material e Método

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na Reserva Caruara, a maior unidade de conservação privada de restinga do Brasil, localizada em São João da Barra, Rio de Janeiro (Reserva Caruara, 2017). A reserva abriga importantes remanescentes de restinga bem preservados, além de trechos de florestas e ambientes associados às lagoas de Iquipari e Grussaí. A região é utilizada por tartarugas marinhas para a nidificação, tornando-se um local estratégico para a implementação do sistema de monitoramento.

Figura 1. Área da Reserva Caruara demarcada em amarelo e as localizações do dispositivo piloto, da sede Administrativa e as lagoas de Iquipari e Grussáí.



Fonte: Airbus (2025)

É importante destacar a existência desde 2008 do Programa de Monitoramento de Tartarugas Marinhas do Porto do Açu (PMTM), que tem a missão de identificar, proteger e monitorar qualquer ocorrência relativa às tartarugas, incluindo os ninhos, desde a desova até o nascimento dos filhotes. O PMTM contribui de forma expressiva para a conservação do animal, principalmente a espécie *Caretta caretta*, que se reproduz na região (Reserva Caruara, 2023). Além disso, o PMTM registra encalhes de tartarugas marinhas vivas ou mortas, encaminhando para tratamento ou necropsia.

O PMTM já realizou centenas de ações de caminhadas de filhotes e educação ambiental, atingindo um público de mais de 7.500 pessoas (Reserva Caruara, 2023). Mais de 20 mil ninhos e 1,3 milhões de filhotes de tartarugas foram identificados e protegidos, demonstrando a importância da colaboração para a conservação das tartarugas marinhas.

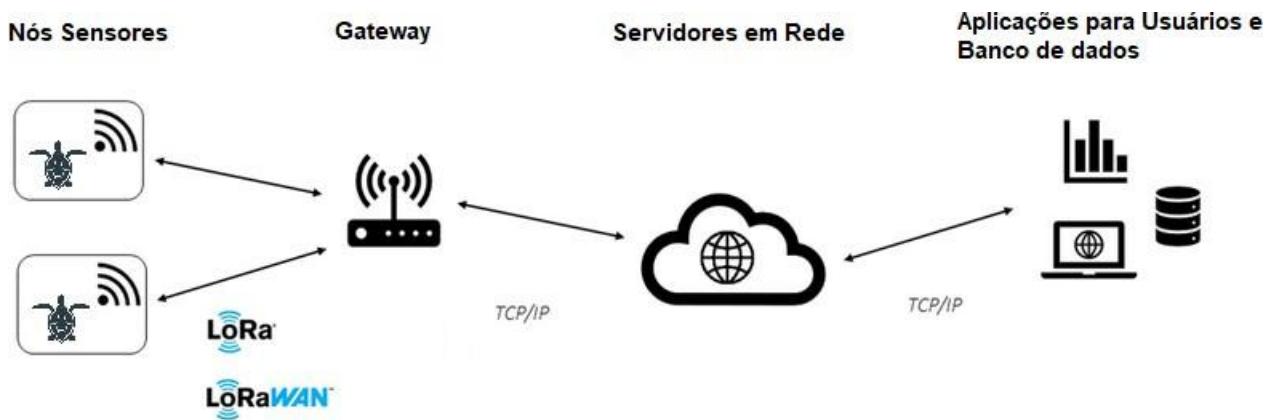
O litoral norte fluminense é considerado uma área de extrema importância biológica por apresentar um

número significativo de desovas e por proporcionar o nascimento de mais machos, o que é fundamental para garantir a variabilidade genética da população (Reserva Caruara, 2023).

2.2. Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento desenvolvido coleta dados por meio de nós sensores instalados nos ninhos e os enviam via LoRaWAN para um gateway. Este retransmite as informações a servidores em nuvem, onde são processadas, armazenadas e disponibilizadas em uma plataforma web de código aberto.

Figura 2. Arquitetura de rede LoRaWAN utilizada no projeto.



Fonte: Autor (2025)

Para este projeto, desenvolveu-se um dispositivo piloto para testes de efetividade, integrando os seguintes componentes do sistema:

2.2.1 Nós Sensores (Dispositivos de Campo)

O coração do sistema de monitoramento é o nó sensor, que consiste em um dispositivo de campo projetado para operar de forma autônoma e confiável nas condições ambientais desafiadoras da Reserva Caruara. Para este projeto piloto, foi desenvolvido um dispositivo específico para testes de efetividade, integrando os seguintes componentes:

- Sensor de Temperatura (DS18B20): A escolha do sensor de temperatura recaiu sobre o modelo DS18B20, um sensor digital amplamente utilizado em aplicações de monitoramento devido à sua precisão, confiabilidade e facilidade de integração. Suas principais características técnicas incluem:
 - Faixa de medição: -55°C a +125°C, permitindo o monitoramento em uma ampla gama de

temperaturas.

- Precisão: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ na faixa de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$, garantindo a acurácia das medições.

- Resolução: 9 a 12 bits (configurável), permitindo ajustar a resolução das medições de acordo com as necessidades da aplicação.

- Alimentação: 3.0V a 5.5V, facilitando a alimentação do sensor com baterias ou outras fontes de energia de baixa tensão.

- Microcontrolador (Wemos Lolin32 Lite): Para controlar o sensor de temperatura, processar os dados e se comunicar com a rede LoRaWAN, foi utilizado o módulo Wemos Lolin32 Lite, que possui as seguintes características:

- Chip: ESP32, um microcontrolador de baixo custo e alto desempenho.

- Processador: Dual-core 32-bit MCU, oferecendo capacidade de processamento suficiente para as tarefas do sistema.

- Memória: 4MB Flash, permitindo o armazenamento do firmware e de dados temporários.

- Conectividade: Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2, oferecendo opções de conectividade para configuração e depuração do sistema.

- Função de Modo Sleep: Para preservar a vida útil da bateria, o módulo foi configurado para operar em modo sleep, com um consumo de corrente de aproximadamente $2.5\mu\text{A}$.

- Alimentação: O módulo é alimentado por uma bateria 18650 de Li-ion, com capacidade de 3000mAh, garantindo uma longa autonomia.

- Comunicação LoRa (SX1276): A transmissão de dados para a central de monitoramento é realizada através do módulo de comunicação LoRa SX1276, que oferece as seguintes vantagens:

- Comunicação a longas distâncias: Permite a transmissão de dados a distâncias de até 10 km em áreas rurais e até 2 km em áreas urbanas.

- Baixo consumo de energia: Otimiza o uso da bateria, permitindo uma longa autonomia do dispositivo.

- Interface SPI: Facilita a conexão com o microcontrolador.

- Proteção e Camuflagem: Para garantir a proteção do sistema eletrônico contra as intempéries e evitar o vandalismo, todo o dispositivo piloto foi encapsulado em uma estrutura composta por tubos e caps

de PVC, mimetizando as hastes de sinalização convencionais já utilizadas pelo Projeto Tamar para marcar ninhos. Esta abordagem garante não apenas a proteção adequada dos componentes eletrônicos contra areia e umidade, mas também reduz significativamente o risco de furto ou depredação por sua aparência discreta e similar aos marcadores convencionais.

Figura 3. Imagem do dispositivo piloto desenvolvido com: 1 - Antena, 2 - Sensor de temperatura DS18B20, 3 - Sistema eletrônico e 4 - Invólucro de proteção em PVC.



Fonte: Autor (2025)

2.2.2 Gateway LoRaWAN (Dragino LPS8N)

Como elemento central em uma rede LoRaWAN, o gateway é responsável por receber os dados dos nós sensores e enviá-los para a plataforma de visualização de dados através da internet. Para este projeto, foi escolhido o gateway Dragino LPS8N, que foi instalado em um ponto alto, no Mirante da Sede Administrativa da Reserva Caruara para garantir uma boa cobertura da área de estudo.

2.2.3 Plataforma de Visualização de Dados (Node-RED e PostgreSQL)

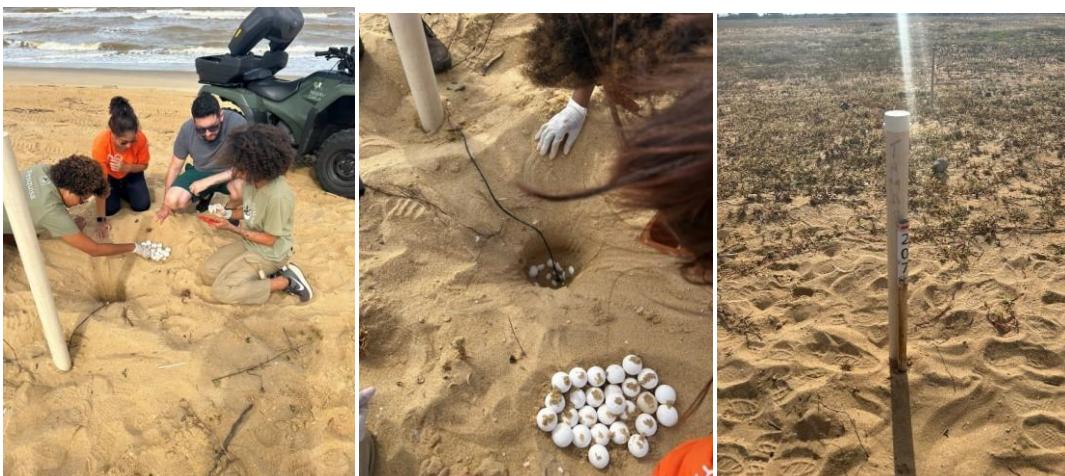
A Plataforma de Visualização de Dados em ambiente WEB foi desenvolvida com a ferramenta low-code Node-RED, ferramenta esta de programação visual que permite a criação de dashboards interativos para

a visualização dos dados coletados. Os dados são armazenados em um banco de dados PostgreSQL, garantindo a integridade e a disponibilidade das informações. Os dois serviços estão ativos em um servidor do Polo de Inovação de Campos dos Goytacazes – PICG, do Instituto federal Fluminense – IFF.

2.3. Instalação e Coleta de Dados

No dia 11 de fevereiro de 2025, em conjunto com a equipe do Projeto Tamar, um ninho de tartaruga marinha foi selecionado para a instalação do sistema de monitoramento. Para garantir a medição representativa da temperatura de incubação dos ovos, o sensor foi cuidadosamente inserido a uma profundidade aproximada de 30 cm no interior do ninho. O sistema foi então configurado para coletar e transmitir os dados de temperatura a cada 30 minutos, enviando-os para a plataforma de visualização através da rede LoRaWAN.

Figura 4. Imagens da instalação do dispositivo piloto em um ninho de tartaruga.



Fonte: Autor (2025)

2.4. Análise de Dados

A interface web do projeto, acessível em <https://iotreservacaruara.org/ui>, permitiu o acompanhamento diário e remoto da evolução das medições do dispositivo piloto, desde o dia de sua instalação (11 de fevereiro de 2025) até o nascimento das tartarugas, registrado em 20 de março de 2025 por volta das 03:27 h.

2.4.1 Interface Monitoramento Tamar

Figura 5: Interface web: Monitoramento Tamar.



Fonte: Autor (2025)

A interface apresenta de forma destacada os valores das últimas leituras de temperatura registradas pelo sensor DS18B20 instalado no interior do ninho monitorado, proporcionando aos pesquisadores visualização imediata e atualizada das condições térmicas que influenciam diretamente o desenvolvimento embrionário e a determinação sexual dos filhotes de tartarugas marinhas. Um campo informativo exibe com precisão a data e hora da última leitura realizada, garantindo aos usuários conhecimento sobre a atualidade dos dados apresentados.

Adicionalmente, reconhecendo a criticidade da autonomia energética para dispositivos instalados em áreas remotas, a interface incorpora um indicador de tensão da bateria, acompanhado por um gráfico de tendência que exibe a variação deste parâmetro nos últimos dias. Esta funcionalidade permite que os pesquisadores monitorem proativamente o status energético do dispositivo, antecipando necessidades de manutenção ou substituição da bateria antes que ocorram interrupções no monitoramento de dados críticos para a pesquisa.

2.4.2 Interface Obter Dados dos Sensores

Nesta interface, o sistema oferece uma solução prática e intuitiva para que os usuários possam acessar e baixar as séries históricas completas dos dados coletados pelos sensores dos dispositivos instalados em campo. O processo de obtenção dos dados foi projetado para ser direto e eficiente, seguindo um fluxo lógico de seleção de parâmetros.

Figura 6: Interface web: Obter Dados dos Sensores.

ETAPA 1

CONSULTAR DISPOSITIVOS

No...	Descrição	Localização
device-01	batV, nivelCm, t...	RPPN Caruara
device-03	batV, temperat...	RPPN Caruara
device-02	batV, nivelCm, t...	RPPN Caruara
device-04	batV, nivelCm, t...	RPPN Caruara
device-05	batV, nivelCm, t...	RPPN Caruara
device-06	batV, nivelCm, t...	RPPN Caruara

ETAPA 2

CONSULTAR DADOS PARA DOWNLOAD

número de registos **874**

AVISO download disponível quando led estiver na cor cinza.

[Download dadosSensores.json](#)
[Download dadosSensores.csv](#)

ID DEVICE SELECIONADO **9**

NOME DEVICE SELECIONADO **device-01**

data **01/04/2025**
início

DATA INICIAL **2025-4-1**

data **18/04/2025**
fim

DATA FINAL **2025-4-19**

Fonte: Autor (2025)

Os resultados são oferecidos em dois formatos universais de intercâmbio de dados: CSV (Comma-Separated Values), ideal para importação em planilhas eletrônicas e ferramentas estatísticas, e JSON (JavaScript Object Notation), formato preferencial para integração com aplicações web e sistemas de processamento automatizado. Esta flexibilidade de formatos garante a compatibilidade com praticamente qualquer ferramenta de análise que os pesquisadores possam utilizar em seus estudos.

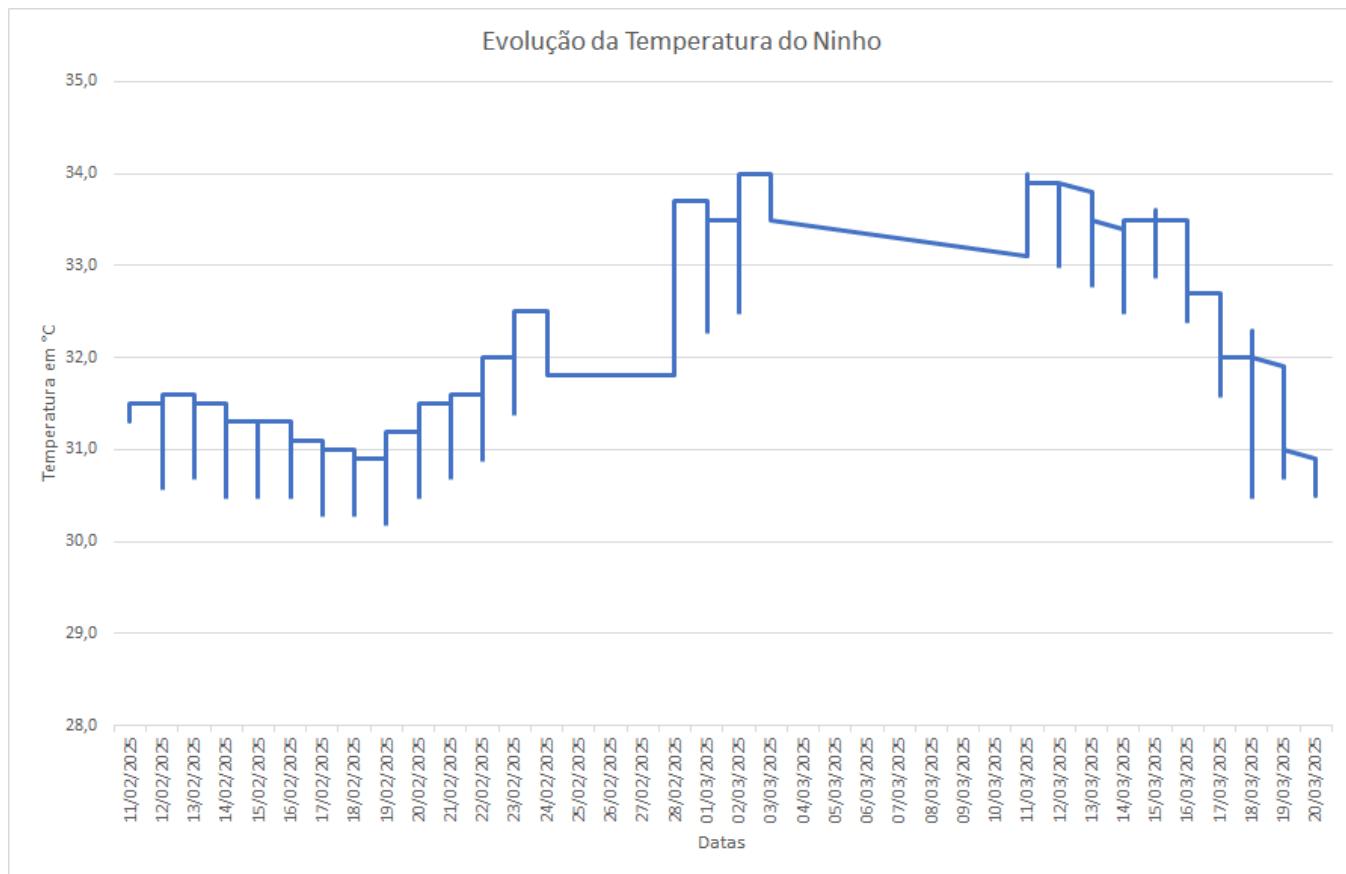
A interface utiliza conexão direta com o banco de dados PostgreSQL, aproveitando os recursos avançados deste sistema de gerenciamento de banco de dados relacional para execução eficiente de consultas temporais complexas, garantindo a rapidez no acesso aos dados mesmo para séries históricas extensas ou com múltiplos parâmetros.

3 Resultados

O Gráfico 1 "Evolução da Temperatura do Ninho" apresenta o perfil térmico ao longo dos 38 dias de

monitoramento. O gráfico evidencia uma evolução térmica no ninho com três padrões principais: estabilidade inicial em torno de 31°C, aumento gradual da temperatura na segunda quinzena de fevereiro, atingindo picos próximos de 34°C no início de março, e posterior declínio nos últimos dias do monitoramento.

Gráfico 1: Evolução da Temperatura do Ninho.



Fonte: Autor (2025)

Considerando que as temperaturas permaneceram predominantemente acima de 29°C durante todo o período monitorado, os dados sugerem condições térmicas que, segundo estudos como os de Mrosovsky & Yntema (1980) e Wibbels (2003), favorecem o desenvolvimento de filhotes fêmeas em muitas espécies de tartarugas marinhas. No entanto, a interpretação precisa sobre a determinação sexual necessitaria de dados adicionais específicos para a espécie em questão, conforme destacado por Fuentes et al. (2017) em suas pesquisas sobre os efeitos das mudanças climáticas na incubação de tartarugas marinhas.

O ninho monitorado nasceu no dia 20 de março de 2025, com 51 dias totais de incubação, tendo um sucesso reprodutivo de 87,6%, ou seja, de um total de 121 ovos, 106 nasceram (PMTM, 2025). Os filhotes foram identificados sendo da espécie *Eretmochelys imbricata* (tartaruga-de-pente), que não é comum na região.

Figura 7: Filhote de Tartaruga-de-Pente Nascida do Ninho Monitorado

Fonte: PMTM (2025)

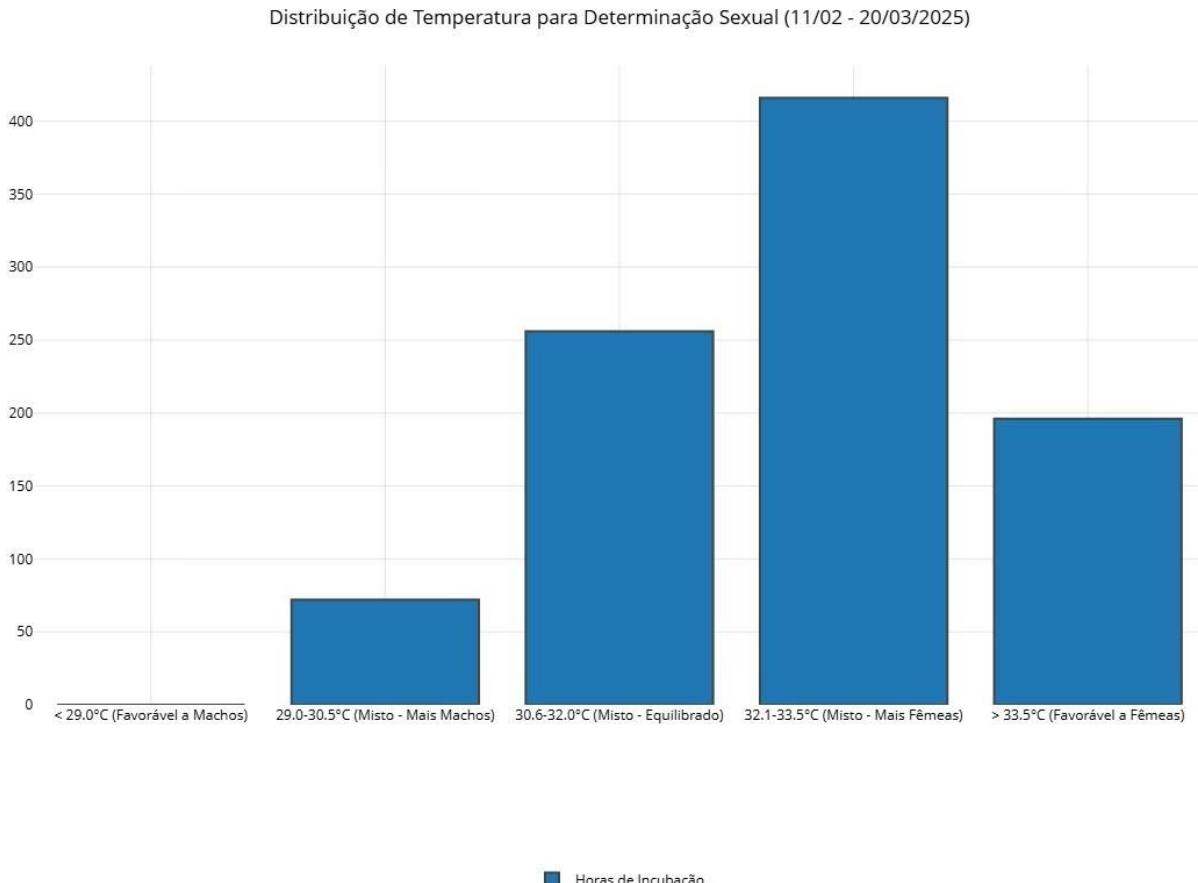


A tartaruga-de-pente está classificada como "Criticamente Ameaçada de Extinção" pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) desde 1996, tendo sofrido um declínio populacional estimado em mais de 80% nas últimas três gerações (IUCN, 2023). No Brasil, onde também figura na Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção (ICMBio, 2014), a espécie é considerada de ocorrência rara, com suas áreas de desova primárias concentradas na região Nordeste, particularmente no litoral norte da Bahia e em Sergipe (ICMBio/TAMAR, 2018).

Esta espécie se destaca por seu bico afiado semelhante ao de um falcão, carapaça com placas sobrepostas em formato de telha e coloração marrom-amarelada com manchas características. Os filhotes nascem com aproximadamente 4 cm de comprimento e os adultos podem atingir até 110 cm de carapaça curva e pesar cerca de 80 kg (Pritchard & Mortimer, 1999).

O Gráfico "Distribuição de Temperaturas e sua Relação com a Determinação Sexual" apresenta a quantidade de horas que o ninho permaneceu em diferentes faixas de temperatura durante o período de Incubação.

Gráfico 2: Distribuição de Temperaturas e sua Relação com a Determinação Sexual



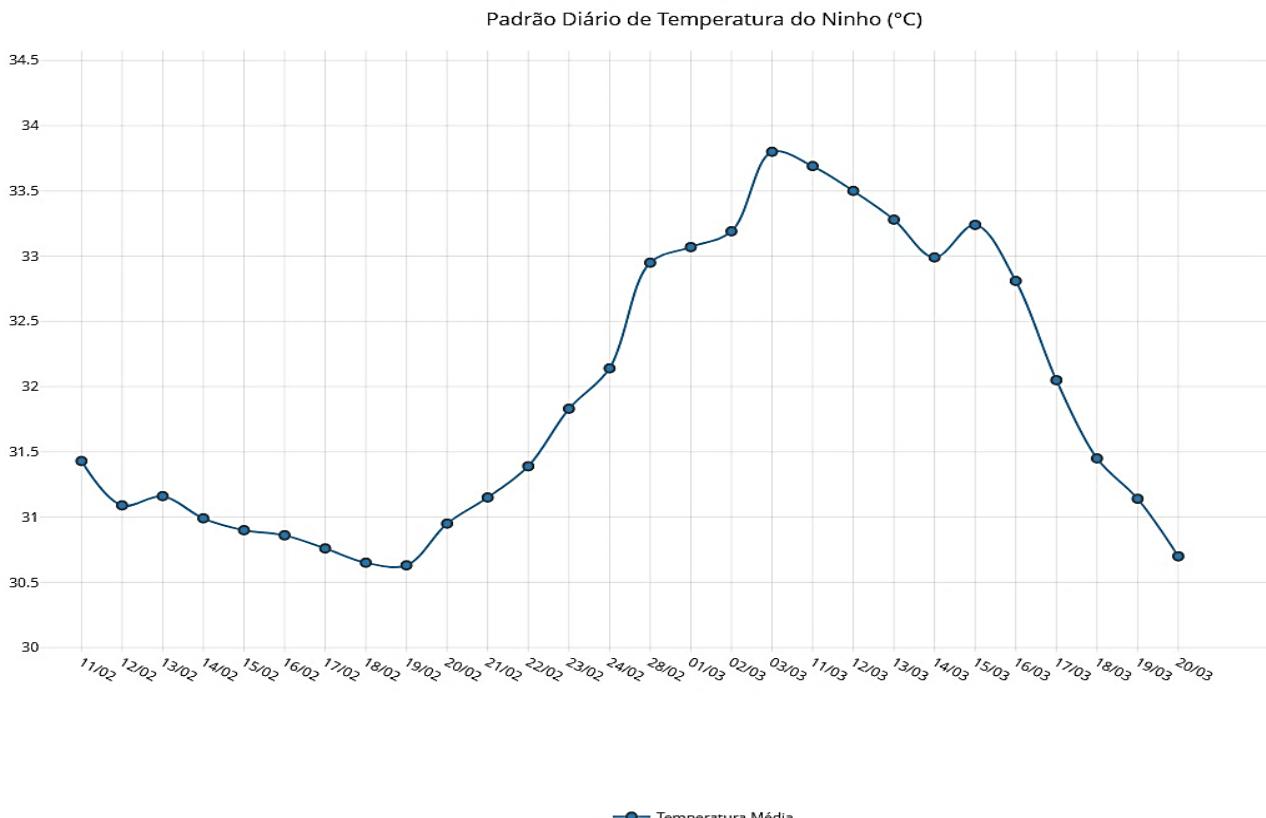
Fonte: Autor (2025)

Os dados revelam que o ninho permaneceu predominantemente em faixas de temperatura entre 30,6°C e 33,5°C, com 416 horas registradas na faixa de 32,1-33,5°C e 256 horas na faixa de 30,6-32,0°C. Não foram registradas temperaturas abaixo de 29,0°C, e apenas 72 horas foram observadas na faixa de 29,0- 30,5°C.

No Brasil, pesquisas conduzidas por Marcovaldi et al. (2016) nas praias do nordeste brasileiro indicaram que a temperatura pivotal para *E. imbricata* encontra-se entre 29,4°C e 29,7°C, com temperaturas acima de 30,5°C resultando em proporções superiores a 80% de fêmeas. Estes estudos enfatizam a particularidade e sensibilidade das espécies às variações térmicas.

Considerando que 74% do tempo de incubação monitorado (612 de 824 horas) ocorreu em temperaturas acima de 32,0°C, e que não foram registradas temperaturas na faixa considerada favorável à produção de machos (<29,0°C), é possível inferir, com base nos parâmetros específicos para *E. imbricata*, uma probabilidade extremamente alta de feminização neste ninho.

Gráfico 3: Padrão Diário de Temperatura do Ninho.



Fonte: Autor (2025)

O Gráfico "Padrão Diário de Temperatura do Ninho" revela uma clara flutuação na temperatura média diária do ninho durante o período registrado. No início, em meados de fevereiro, as temperaturas oscilam em torno de 30.6°C a 31.4°C.

A partir do final de fevereiro, a temperatura começa a subir de forma consistente, atingindo o pico de 33.8°C no dia 3 de março. Após essa máxima, a tendência se inverte e a temperatura inicia um declínio gradual, retornando a patamares próximos de 30.7°C no final do período de monitoramento, em 20 de março. Este comportamento demonstra a dinâmica térmica natural à qual o ninho esteve sujeito até o nascimento.

4 Considerações finais

O presente estudo demonstrou a eficácia do sistema de monitoramento térmico baseado em IoT e LPWANs para acompanhamento não invasivo de ninhos de tartarugas marinhas, fornecendo dados contínuos e precisos sobre as condições durante o período de incubação.

Os resultados obtidos durante os 38 dias de monitoramento revelaram um perfil térmico caracterizado por temperaturas consistentemente elevadas (30,5°C a 33,8°C), significativamente acima da temperatura

pivotal documentada para esta espécie no litoral brasileiro (29,4-29,7°C). Este padrão térmico sugere uma proporção sexual fortemente tendenciada para fêmeas no ninho monitorado, corroborando as preocupações expressas na literatura científica sobre os impactos potenciais das mudanças climáticas na viabilidade populacional desta espécie.

A variação térmica observada ao longo do período, com aumento gradual seguido de declínio pré-eclosão, fornece informações valiosas sobre a dinâmica térmica natural dos ninhos e sua relação com fatores ambientais e metabólicos. Estas informações podem subsidiar modelos preditivos mais precisos sobre os efeitos do aquecimento global na reprodução das tartarugas marinhas.

O sistema implementado demonstrou ser uma ferramenta promissora para programas de conservação, permitindo o monitoramento contínuo sem a necessidade de intervenções frequentes nos ninhos, o que reduz riscos de perturbação do processo natural de incubação. Além disso, a metodologia empregada pode ser facilmente replicada e adaptada para outras espécies e localidades, contribuindo para uma compreensão mais ampla dos fatores que influenciam o sucesso reprodutivo das tartarugas marinhas em diferentes contextos.

Como limitação do estudo, ressalta-se que o monitoramento iniciou-se apenas no 11/02, não cobrindo todo o primeiro terço do período de incubação. Para estudos futuros, recomenda-se o aprimoramento do sistema para captura de dados desde o momento da postura, bem como a integração com possíveis sensores adicionais para monitoramento de outros parâmetros relevantes, como por exemplo: umidade do substrato e trocas gasosas na câmara de incubação.

Finalmente, os dados obtidos reforçam a urgência de implementação de estratégias de mitigação e adaptação face às mudanças climáticas, especialmente para a área moniotrada, com grande importância para o nascimento de machos. Medidas como sombreamento artificial de áreas de desova, transplante de ninhos para locais com condições térmicas mais favoráveis e estabelecimento de novas áreas protegidas que considerem cenários futuros de aquecimento podem ser cruciais para a conservação desta espécie em longo prazo.

Este estudo constitui uma contribuição significativa não apenas para o conhecimento dos parâmetros reprodutivos das tartarugas marinhas no litoral brasileiro, mas também para o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias de monitoramento remoto que podem ser incorporadas a programas de conservação de tartarugas marinhas em escala global.

Referências

- BATISTA, B. J. et al. **IoT platform for monitoring environmental variables in sea turtle nests.** In: IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND COMPUTING (COLCOM), 2019, [S.I.]. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2019. p. 1-6.
- FUENTES, M. M. P. B. et al. **Potential adaptability of marine turtles to climate change: insights from contemporary plasticity and historical adaptation.** BioScience, v. 67, n. 8, p. 702-712, 2017.
- FUENTES, M. M. P. B.; LIMPUS, C. J.; HAMANN, M. **Vulnerability of sea turtle nesting grounds to climate change.** Global Change Biology, v. 17, n. 1, p. 140-153, 2011.
- GLEN, F.; MROSOVSKY, N. **Antigua revisited: the impact of climate change on sand temperatures.** Nature, v. 430, p. 732, 2004. DOI: 10.1038/430732a.
- HAMANN, M. et al. **Global research priorities for sea turtles: informing management and conservation.** Endangered Species Research, v. 11, n. 3, p. 245-269, 2010.
- ICMBio/TAMAR. **Plano de Ação Nacional para a Conservação das Tartarugas Marinhas - PAN Tartarugas Marinhas.** Brasília: ICMBio, 2018.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Portaria MMA Nº 444, de 17 de dezembro de 2014:** Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 dez. 2014. Seção 1, p. 121-126.
- IUCN. **The IUCN Red List of Threatened Species.** Version 2023-1. [S.I.]: IUCN, 2023. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: 30 abr. 2025.
- JENSEN, M. P. et al. **Environmental warming and feminization of one of the largest sea turtle populations in the world.** Current Biology, v. 28, n. 1, p. 154-159, 2018.
- MARCOVALDI, M. Â. et al. **Satellite tracking of hawksbill turtles *Eretmochelys imbricata* nesting in northern Bahia, Brazil:** Turtle movements and foraging destinations. Endangered Species Research, v. 31, p. 25-35, 2016. DOI: 10.3354/esr00763.
- MARQUES, G., PITARMA, R., & GARCIA, N. M. **LoRaWAN-Based Environmental Monitoring System for Smart Cities.** Applied Sciences, 10(6), 2051, 2020.
- MROSOVSKY, N.; YNTEMA, C. L. **Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: implications for conservation practices.** Biological Conservation, v. 18, n. 4, p. 271-280, 1980.
- PRITCHARD, P. C. H.; MORTIMER, J. A. **Taxonomy, external morphology, and species identification.** In: ECKERT, K. L. et al. (Eds.). Research and management techniques for the conservation of sea turtles. IUCN/SSC Marine Turtle Specialist Group Publication No. 4. Blanchard, PA: IUCN, 1999. p. 21-38.
- RESERVA CARUARA (2017) Plano de Manejo RPPN Caruara. São João da Barra: **Reserva Particular do Patrimônio Natural Caruara.** Disponível em: <https://esg.portodoacu.com.br/wpcontent/uploads/2022/02/8.-Plano-de-Manejo-caruara_CADERNO-1_WEB_Final.pdf> Acesso em: 30 abr. 2025.

RESERVA CARUARA. **Programas:** Programa de Monitoramento de Tartarugas Marinhas do Porto do Açu (PMTM). [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: www.reservacaruara.com.br/programas. Acesso em: 30 abr. 2025.

SANTOS, A. J. B. et al. **Nest-site selection and digging behaviour by hawksbill turtles *Eretmochelys imbricata* in Brazil.** *Marine Biology Research*, v. 13, n. 1, p. 63-73, 2017. DOI: 10.1080/17451000.2016.1212473.

THOMÉ, J. C. A. et al. **Nesting biology and conservation of the leatherback sea turtle (*Dermochelys coriacea*) in the state of Espírito Santo, Brazil.** *Chelonian Conservation and Biology*, v. 6, n. 1, p. 15-27, 2007.

WIBBELS, T. **Critical approaches to sex determination in sea turtles.** In: LUTZ, P. L.; MUSICK, J. A.; WYNEKEN, J. (Eds.). *The Biology of Sea Turtles, Volume II*. Boca Raton: CRC Press, 2003. p. 103-134.

WILSON, E. C. et al. **Evaluating the effectiveness of management interventions in mitigating the impact of climate change on sea turtles.** *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 14397, 2018.

YNTEMA, C. L.; MROSOVSKY, N. **Critical periods and pivotal temperatures for sexual differentiation in loggerhead sea turtles.** *Canadian Journal of Zoology*, v. 60, n. 5, p. 1012-1016, 1982.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro através do projeto MAI/DAI, à RPPN Caruara pela parceria e incentivo, e aos nossos orientadores D.Sc. Vicente de Paulo Santos de Oliveira e D.Sc. Thiago Moreira de Rezende Araújo, bem como ao mentor D.Sc. William da Silva Vianna, pela orientação e apoio. Reconhecemos a dedicação do D.Sc. Jader Lugon Junior na coordenação do curso Ambhidro e agradecemos aos discentes pela colaboração. Agradecemos também a Fundação Projeto Tamar e Reserva Caruara pela parceria e apoio na execução.