



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

JOSE CARLOS GOMES ROBERTO

DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA DE TEMPERATURA MULTIPONTO

CUIABÁ - MT
2025

JOSE CARLOS GOMES ROBERTO

DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA DE TEMPERATURA MULTIPONTO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. João Basso Marques

**CUIABÁ-MT
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

R642d Roberto, Jose Carlos Gomes.

Desenvolvimento de uma sonda de temperatura multiponto [recurso eletrônico] / Jose Carlos Gomes Roberto. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 77 f., il. color., pdf). -- 2025.

Orientador: João Basso Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. DS18B20. 2. Fluxo de calor no solo. 3. Sensores digitais. 4. Sonda de temperatura multiponto. I. Marques, João Basso, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA DE TEMPERATURA MULTIPONTO

AUTOR: MESTRANDO JOSE CARLOS GOMES ROBERTO

Dissertação defendida e aprovada em **04 de dezembro de 2025**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES [Presidente Banca / Orientador]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROF. DR. PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROF. DR. ELVIS LIRA DA SILVA [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

CUIABÁ, 04/12/2025.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, Docente da **Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/12/2025, às 14:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELVIS LIRA DA SILVA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/12/2025, às 15:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/12/2025, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 11/12/2025, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **8718978** e o código CRC **164B1DED**.

Dedico este trabalho
A todos que de alguma
forma contribuiu para
sua finalização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e Jesus Cristo, pela dádiva da vida e por ser a força e o apoio constante em todos os momentos.

À minha família, especialmente à minha mãe Maria, por todo o amor, carinho e compreensão durante este período de intensa dedicação.

Ao Professor Doutor João Basso Marques, pela orientação, pela paciência, pela tolerância e acima de tudo pela confiança depositada, fatores que viabilizaram a elaboração e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Paulo Arruda (Paulão), pela valiosa ajuda e por indicar os caminhos a serem seguidos.

Ao Professor Dr. Elvis Lira, pelo incentivo e apoio.

Aos Professores Sergio, Marcelo, Leone, Iramaia, Marta, Nadja, pelo conhecimento transmitido e acolhimento.

Aos amigos de laboratório Andreia Aguilera, Lucas Ramos, João Guilherme e Nicolas Neves pelo companheirismo diário e pelo auxílio constante.

Aos amigos da pós-graduação, Madson, Maicon, e a todos os demais amigos que ofereceram apoio e motivação.

Aos amigos Adrian, Alder e Eldo pela dedicação, ajuda e contribuição nesta fase final da pesquisa.

A amiga Emilly Kalinski pela ajuda e contribuição na fase inicial da pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, por todo conhecimento transmitido e acolhimento.

A Soilce e Flair pelo apoio concedido ao longo deste período de Mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O essencial é invisível aos olhos,
mas mensurável pelo que faz.
Antoine de Saint-Exupéry

Conhecer com
precisão o que está
sob os pés é o primeiro
passo para salvaguardar o
que está acima da cabeça.

RESUMO

O monitoramento do perfil térmico do solo em profundidades de 10 metros, é relevante para estudos ambientais e micrometeorológicos, podendo ser um parâmetro para modelagem climática e aplicações na agricultura. O conhecimento da distribuição da temperatura em profundidade é necessário, visto que as variações térmicas diárias e sazonais do solo influenciam nos processos hidrológicos e no comportamento dos ecossistemas. Apesar da importância, o alto custo de equipamento comercial para monitoramento ambiental restringe a densidade e a continuidade de observações em campo. Este estudo visa contornar essa limitação por meio do desenvolvimento de uma sonda de temperatura multiponto de baixo custo. A sonda é composta por 58 sensores digitais DS18B20, que são caracterizados por seu baixo custo, por operarem em uma ampla faixa de temperatura ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$), com precisão de ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na faixa principal de operação) e por utilizarem o protocolo *1-Wire*, que simplifica a rede e a aquisição de dados quase simultânea. Os sensores foram dispostos em espaçamentos planejados ao longo de um perfil de 10 metros, com maior resolução nas camadas mais próximas à superfície. O sistema proposto destaca a acessibilidade tecnológica e o baixo custo de produção. Os resultados de calibração, obtidos por meio da comparação com um sensor de referência em banho térmico, demonstram que os ajustes aplicados por regressão linear garantiram um alto Coeficiente de Determinação ($R^2 > 0,99$) para a maioria dos sensores e a redução significativa do erro. O Erro Absoluto Médio (MAE) foi reduzido de aproximadamente $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cerca de $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, assegurando a consistência das medições. A boa precisão e consistência observadas nas leituras iniciais no teste de calibração confirmam a confiabilidade da sonda para aplicação em estações meteorológicas e sistemas de monitoramento contínuo voltados para pesquisas ambientais e agrícolas. Esses resultados demonstram que o instrumento oferece uma alternativa viável para investigações detalhadas da interação entre o solo e a atmosfera.

Palavras-chave: DS18B20; fluxo de calor no solo; sensores digitais; sonda de temperatura multiponto.

ABSTRACT

Monitoring the soil thermal profile at depths up to 10 meters is relevant for environmental and micrometeorological studies, and serves as a parameter for climate modeling and agricultural applications. Knowledge of temperature distribution with depth is important, given that the soil's daily and seasonal thermal variations influence hydrological processes and ecosystem behavior. Despite its importance, the high cost of commercial equipment for environmental monitoring restricts the density and continuity of field observations. This study aims to overcome this limitation through the development and validation of a low-cost, multi-point digital probe. The probe is composed of 58 DS18B20 digital sensors, which are characterized by their low cost, operation over a wide temperature range ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$), with an accuracy of ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the main operating range), and by using the 1-Wire protocol, which simplifies the network and enables near-simultaneous data acquisition. The sensors were arranged at planned spacings along a 10 meter profile, with higher resolution in the layers closest to the surface. The proposed system highlights technological accessibility and low production cost. Calibration results, obtained by comparison with a reference sensor in a thermal bath, confirm that the adjustments applied via linear regression guaranteed a high Coefficient of Determination ($R^2 > 0,99$) for most sensors and a significant reduction in error. The Mean Absolute Error (MAE) was reduced from approximately $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ to about $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, ensuring the consistency of the measurements. The high precision and consistency observed in the initial readings during the calibration test confirm the probe's reliability for application in weather stations and continuous monitoring systems aimed at environmental and agricultural research. These results demonstrate that the instrument offers a robust, stable, and economically viable alternative for detailed investigations of the soil-atmosphere interaction.

Keywords: DS18B20; digital sensors; multipoint temperature probe; soil heat flux.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variação da temperatura e propagação da onda de calor no perfil do solo em diferentes profundidades. Adaptado de Hillel (2003) e Baker e Baker (2002).	17
Figura 2. Esquema conceitual de um sistema de monitoramento térmico do solo conectados em barramento 1-Wire a um módulo de aquisição de dados.	20
Figura 3. Diagrama em bloco do arranjo da sonda multiponto.	22
Figura 4. Perfil de profundidade dos sensores da sonda multiponto.	24
Figura 5. Teste inicial dos sensores montados em placa protoboard.	25
Figura 6. Diagrama elétrico simplificado da sonda multiponto.	25
Figura 7. (a) Sensor DS18B20; (b) Processo de soldagem individual; (c) Agrupamento sensores.	26
Figura 8. Diagrama de fluxo do software de aquisição da sonda multiponto.	27
Figura 9. (a) Preparação da sonda multiponto para calibração junto ao sensor de referência; (b) Sonda e sensor de referência submersos em banho térmico.	28
Figura 10. Localização do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA).	29
Figura 11. (a) Local da perfuração para instalação da sonda de temperatura multiponto; (b) Sonda instalada no ponto de medição.	30
Figura 12. Processo de perfuração para instalação da sonda de temperatura multiponto.	31
Figura 13. Conjunto de gráficos comparação da sonda multiponto e do sensor de referência (dados medidos).	34
Figura 14. Conjunto de gráficos da Regressão linear da sonda multiponto.	37
Figura 15. Erro Absoluto Médio (MAE) antes e após a calibração dos sensores.	38
Figura 16. Conjunto de gráficos Comparação entre sonda multiponto, sensor de referência e sensores calibrados.	42
Figura 17. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 0 a 50 cm. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.	44
Figura 18. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 0 a 7,10 m. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.	46
Figura 19. Perfis Taltocrônicos de 0 a 7,10 m. (Set-Nov 2025).	47
Figura 20. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 3,70 a 6,90 m. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.	49
Figura 21. Serie temporal da temperatura do solo instalado na área experimental.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre diferentes tipos de sensores de temperatura utilizados em estudos ambientais.....	21
Tabela 2. Custo dos materiais da Sonda de temperatura multiponto.....	27
Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2) Sonda multiponto e Sensor de referência.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1-Wire – Protocolo digital de comunicação de um fio utilizado em sensores DS18B20

4G – *Fourth Generation Mobile Network*, rede móvel de quarta geração

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C – Capacidade térmica volumétrica do solo

°C – Grau Celsius

CR1000 – Datalogger da Campbell Scientific

CSV – *Comma-Separated Values*

CS108 – Sensor de temperatura de referência

D – Difusividade térmica do solo

DS18B20 – Sensor digital de temperatura

DZAA – Profundidade de Zero Amplitude Anual

ESP32 – Microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth

FAO – Food and Agriculture Organization

G – Fluxo de calor no solo

HFP – *Heat Flux Plate* (placa de fluxo de calor)

IoT – Internet das Coisas

K – Condutividade térmica do solo

LoRa – *Long Range Radio*, comunicação de longo alcance

MAE – Mean Absolute Error

MT – Mato Grosso

PPGFA – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

R² – Coeficiente de determinação

ROM – Read-Only Memory

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

VCC – Tensão de alimentação contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Propriedades do Solo	15
2.2	Propriedades Térmicas e Dinâmica do Solo.....	16
2.3	Interações Solo, Água e Temperatura.....	18
2.4	Monitoramento e Instrumentação	19
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1	Desenvolvimento da Sonda Multiponto	22
3.1.1	Configuração do Hardware e Arquitetura do Sistema.....	22
3.1.2	Perfil de Profundidade	23
3.1.3	Montagem e Diagrama Elétrico.....	24
3.1.4	Processo de Soldagem e Isolamento.....	25
3.1.5	Software e Aquisição de Dados.....	26
3.1.6	Custo dos Materiais	27
3.2	Calibração da Sonda Multiponto	28
3.2.1	Procedimento de Ensaio	28
3.2.2	Análise Estatística	28
3.3	Local de Desenvolvimento e Instalação em Campo.....	29
3.3.1	Localização do Estudo.....	29
3.3.2	Instalação da Sonda no Solo	29
3.3.3	Dificuldades Operacionais durante a Perfuração.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Comparação entre a Sonda Multiponto e o Sensor de Referência	32
4.2	Regressão Linear da Sonda Multiponto.....	35
4.3	Avaliação do Erro Absoluto Médio (MAE)	38
4.4	Avaliação do Coeficiente de Determinação (R^2).....	38
4.5	Comparação Sensor de Referência, Sensor não Calibrado e Sensor Calibrado	39
4.6	Perfis tautócronos da temperatura do solo.....	42
4.7	Perfil temporal da temperatura do solo instalado na área experimental.....	49
4.8	Discussão Geral	51
5	CONCLUSÃO.....	52

5.1	Contribuições do Estudo.....	53
5.2	Limitações e Incertezas	53
5.3	Recomendações e Trabalhos Futuros	54
5.4	Considerações Finais	54
6	REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A – Gráficos.....		58
	Gráficos dados medidos	58
	Gráficos Regressão Linear	64
	Gráficos Dados medidos e calibrados	70

1 INTRODUÇÃO

A temperatura do solo tem sido considerada um parâmetro relevante para compreender as interações entre a superfície terrestre e a atmosfera, influenciando nos processos hidrológicos, e no funcionamento dos ecossistemas (Lozano-Parra *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021). Sua determinação é frequentemente utilizada em estudos ambientais, modelagem climática e aplicações agrícolas, por estar associada às trocas de energia e massa com a atmosfera e nas dinâmicas de aquecimento e resfriamento do solo (Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003).

A forma como o calor se propaga através do solo é, em sua maioria, controlada pela condução descrita pela Lei de Fourier. Esse processo depende de propriedades térmicas intrínsecas do solo como a condutividade térmica (λ), pela capacidade de calor por volume (C) e pela difusividade térmica ($\alpha = \lambda/C$) (Diniz; Albuquerque; Rafael, 2014; Hillel, 2003). Esse comportamento está associado ao amortecimento e ao atraso das oscilações térmicas diárias e sazonais, que se atenuam com o aumento da profundidade até atingirem um ponto em que a variação anual da temperatura é mínima, conhecido como Profundidade de Zero Amplitude Anual (DZAA). Estudos indicam que, em solos tropicais e temperados, a DZAA é localizada geralmente entre 8 e 12 metros (Baker; Baker, 2002; Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003; Teleszewski *et al.*, 2022).

A dinâmica térmica do solo integra o armazenamento de energia no sistema terrestre (Baker; Baker, 2002), sendo determinante para aplicações que abrange desde a agricultura de precisão até o dimensionamento de sistemas geotérmicos de baixa temperatura (Teleszewski *et al.*, 2022). Contudo, a medição com alta resolução espacial e temporal do perfil de temperatura do solo, ainda representa um desafio metodológico, especialmente quando se busca profundidades superiores a alguns metros. Essa medição é tradicionalmente dependente de instrumentação de alto custo e instalação complexa, o que por sua vez limita a densidade e a continuidade de observações ambientais (Van Loon; Bastings; Moors, 1998).

No Brasil, pesquisas realizadas em diferentes biomas indicam que a condutividade térmica (λ) do solo varia de acordo com a umidade, a densidade e a composição de minerais presentes no solo (Costa, 2023; de Moraes Danelichen; Biudes, 2011; Diniz; Albuquerque; Rafael, 2014). Dessa forma, a caracterização de perfis térmicos em diferentes profundidades pode vir a contribuir para reduzir as incertezas associadas na estimativa do fluxo de calor no solo (G), um parâmetro necessário para o fechamento do balanço de energia na superfície, calculável a partir da Lei de Fourier.

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico e a disseminação de placas de desenvolvimento amplamente empregadas como *Arduino*, *Raspberry Pi* e *ESP32*, têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental de baixo custo baseados em sensores digitais. Entre esses dispositivos o sensor DS18B20, que utiliza o protocolo de comunicação digital de um fio (*1-Wire*), apresenta precisão típica de 0,5 °C e identificação única por código ROM, o que permite sua integração em redes multiponto com grande densidade de sensores para aquisição de dados (MAXIM INTEGRATED, 2015). Estudos demonstram que após calibração em banho térmico, o erro pode ser reduzido para valores inferiores a 0,1 °C (Elyounsi; Kalashnikov, 2021; Koestoer *et al.*, 2019), ampliando sua aplicabilidade em experimentos científicos e sistemas de monitoramento ambiental (Manurung *et al.*, 2023).

A possibilidade de redes de monitoramento térmico robustas, acessíveis e de alta resolução vem sendo confirmada em estudos recentes, demonstrando o potencial dessas tecnologias para expandir a capacidade de observação e análise de processos ambientais (Zaszewski; Gruszczyński, 2023). Essa expansão é especialmente relevante em regiões de alta complexidade e sensibilidade ecológica, como o bioma Pantanal e suas áreas de transição com o Cerrado. Pesquisas pontuais já evidenciaram padrões específicos de fluxo de calor e difusividade térmica nesses ambientes, mas ainda há escassez de dados contínuos e de alta resolução em profundidade, principalmente em áreas de transição de dois ou mais biomas, onde interações entre diferentes formas de vegetação e tipos de solo geram gradientes microclimáticos expressivos (Lozano-Parra *et al.*, 2018).

Diante desse cenário, a relevância científica da variável, a oportunidade tecnológica de baixo custo e a lacuna de dados observacionais em regiões críticas, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma sonda de temperatura multiponto. O dispositivo é composto por 58 sensores DS18B20, distribuídos em um perfil de 10 metros, para o monitoramento contínuo da temperatura do solo. Os ensaios de calibração por comparação demonstraram elevada precisão e consistência nas leituras. Assim, o dispositivo se mostra como uma alternativa para o estudo da dinâmica térmica do solo e a interação solo-atmosfera.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades do Solo

O solo é um sistema físico, químico e biológico complexo que desempenha funções essenciais nos ecossistemas terrestres, atuando como meio de suporte à vegetação, reservatório de água e nutrientes, filtro de poluentes e interface dinâmica entre biosfera, litosfera, hidrosfera e atmosfera (Campbell; Norman, 2000; Fao; others, 2018; Hillel, 2003). Sua estrutura integra processos ecológicos fundamentais e exerce influência no balanço de energia da superfície terrestre.

A temperatura do solo é um parâmetro de grande relevância ecológica e biológica, regulando processos como germinação, crescimento radicular, respiração microbiana e mineralização de nutrientes, afetando tanto o desenvolvimento das plantas quanto a produtividade agrícola (Costa, 2023; Wang *et al.*, 2021). Além disso, desempenha papel determinante nas trocas de energia solo-atmosfera, controlando a intensidade e a direção do fluxo de calor no solo (Rodrigues, 2014).

Do ponto de vista físico, o comportamento térmico do solo depende de propriedades como condutividade térmica (λ), capacidade térmica volumétrica (C) e difusividade térmica ($\alpha = \lambda/C$), todas fortemente influenciadas pela textura, composição mineralógica, densidade e pelo teor de umidade (Diniz; Albuquerque; Rafael, 2014; Hillel, 2003). Essas características controlam o amortecimento e o atraso das oscilações térmicas diárias e sazonais, fenômenos que se tornam progressivamente mais marcantes com o aumento da profundidade. Tal efeito conduz ao estabelecimento da Profundidade de Zero Amplitude Anual (DZAA), na qual as variações térmicas associadas ao ciclo anual praticamente desaparecem (Baker; Baker, 2002; Teleszewski *et al.*, 2022).

A distribuição vertical da temperatura também tem implicações em escalas geofísicas. Estudos paleoclimáticos demonstram que as perturbações térmicas superficiais são registradas nas camadas subsuperficiais ao longo de décadas a séculos, permitindo reconstruções de temperatura histórica e contribuindo para a compreensão das tendências de aquecimento global. Tais registros térmicos de subsolo têm sido amplamente utilizados para inferir o histórico climático recente e validar modelos de aquecimento superficial, sendo o método reconhecido como uma ferramenta independente para verificar tendências observadas por séries meteorológicas e satelitais (Beltrami *et al.*, 2017; Lyu; Orsi; Goosse, 2020).

No contexto brasileiro, solos tropicais apresentam elevada variabilidade espacial em suas propriedades térmicas devido às diferenças em umidade, compactação e composição mineral. Pesquisas indicam a relevância de medições locais para reduzir incertezas na

estimativa do fluxo de calor no solo e melhorar a caracterização de processos biológicos, ambientais e hidrológicos (Costa, 2023; de Moraes Danelichen; Biudes, 2011).

Essa complexidade física e a necessidade de observações contínuas reforçam a importância do monitoramento térmico em múltiplas profundidades. Sistemas tradicionais, contudo, tendem a oferecer baixa resolução espacial ou custos elevados, o que pode limitar sua aplicação em ecossistemas de grande extensão. Nesse cenário, tecnologias de aquisição digital e sensores de baixo custo apresentam potencial significativo para ampliar a densidade e a qualidade das observações, fornecendo bases quantitativas para estudos micrometeorológicos, modelagem e monitoramento ambiental (Adhikari; Hartemink, 2016; Zaszewski; Gruszczyński, 2023).

2.2 Propriedades Térmicas e Dinâmica do Solo

As propriedades térmicas do solo determinam a forma como a energia é armazenada, conduzida e distribuída entre suas camadas. Essas propriedades são tradicionalmente descritas por três parâmetros fundamentais: condutividade térmica (K), capacidade térmica volumétrica (C) e difusividade térmica (D) (Hillel, 2003).

A condutividade térmica (K) representa a capacidade do solo de conduzir calor e depende de fatores como composição mineral, porosidade, densidade e, do teor de água (Campbell; Norman, 2000). Solos secos e arenosos apresentam condutividade mais baixa, enquanto solos úmidos com maior proporção de argila possuem maior condutividade devido à substituição do ar nos poros do solo pela água, que conduz calor de forma mais eficiente.

A capacidade térmica volumétrica (C) indica a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de volume do solo em 1 °C. Essa capacidade aumenta com o teor de água, uma vez que a água possui calor específico maior que o ar e que os sólidos minerais (Baker; Baker, 2002).

A difusividade térmica ($D = K/C$), descreve a rapidez com que o solo responde às mudanças de temperatura. Solos com alta difusividade aquecem e resfriam rapidamente, facilitando a penetração da onda térmica; enquanto solos com baixa difusividade, apresentam respostas mais lentas e maior amortecimento das variações térmicas (Romio *et al.*, 2022).

O fluxo de calor no solo (G) é descrito pela Lei de Fourier, expressa por:

$$G = -K\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

Onde $\frac{\partial T}{\partial z}$ é o gradiente térmico vertical. O sinal negativo indica que o calor flui espontaneamente das regiões mais quentes para as mais frias (Hillel, 2003).

A variação da temperatura do solo ao longo do tempo e da profundidade define sua dinâmica térmica. Nas camadas superficiais, as oscilações diárias e sazonais são mais intensas devido à forte influência da radiação solar, enquanto em maiores profundidades essas oscilações se tornam mais atenuadas e apresentam atraso na propagação das ondas de calor, fenômeno conhecido como atraso de fase. Em ambientes tropicais essa defasagem é amplamente observado, indicando que as camadas mais profundas respondem lentamente as mudanças atmosféricas com forte variabilidade climática e a influência da umidade (Costa, 2023).

Esse comportamento é ilustrado na Figura 1, que representa a propagação da onda térmica em um perfil de solo homogêneo. Observa-se que a amplitude térmica diminui com a profundidade e que os ciclos diários se tornam mais suaves e defasados em relação à superfície. As setas indicam o fluxo de calor (G), que se desloca conforme o gradiente térmico: durante o dia, o fluxo tende a ser descendente, com armazenamento de calor; e durante a noite torna-se ascendente, liberando energia para a superfície.

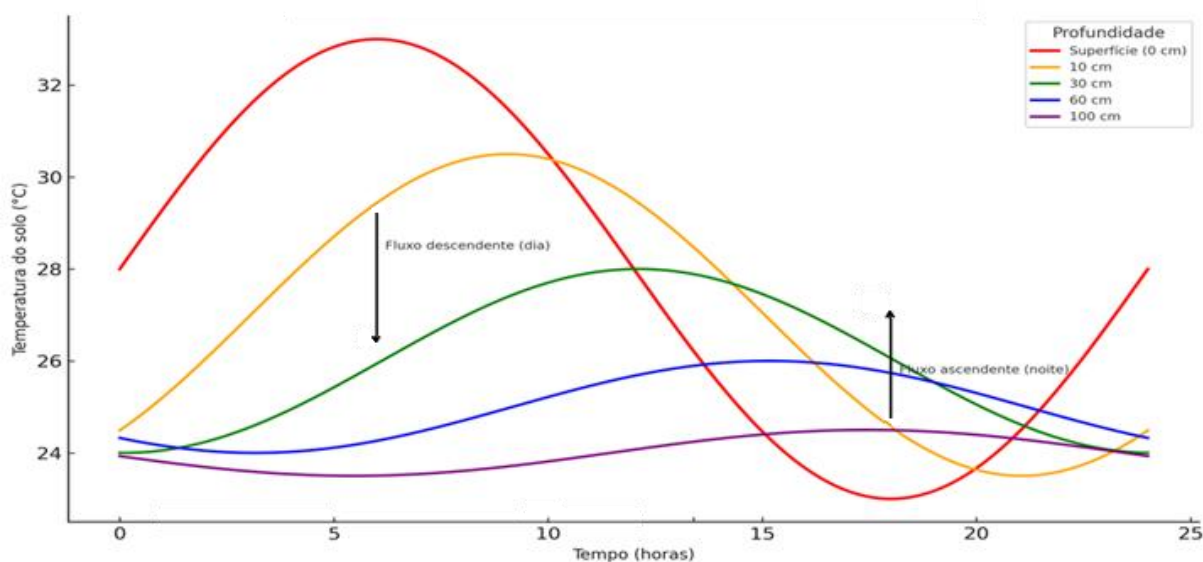


Figura 1. Variação da temperatura e propagação da onda de calor no perfil do solo em diferentes profundidades. Adaptado de Hillel (2003) e Baker e Baker (2002).

A compreensão desses processos é necessária para o cálculo do fluxo de calor no solo e para o entendimento do balanço de energia em regiões tropicais e de transição, como o Cerrado–Pantanal. O estudo da variação térmica com a profundidade permite identificar padrões de

amortecimento e determinar a Profundidade de Zero Amplitude Anual (DZAA), ponto a partir do qual as oscilações sazonais praticamente deixam de ocorrer (Baker; Baker, 2002).

Em razão dessa complexidade física, medições contínuas e de alta resolução em múltiplas profundidades são fundamentais para caracterizar a dinâmica térmica do solo. Essa necessidade reforça a importância do desenvolvimento de sistemas instrumentais dedicados, como sondas multiponto, capazes de registrar simultaneamente o comportamento térmico ao longo de todo o perfil vertical.

2.3 Interações Solo, Água e Temperatura

A interação entre solo, água e temperatura constitui um dos componentes fundamentais do funcionamento ambiental, influenciando a partição de energia na superfície terrestre, o ciclo hidrológico e diversos processos ecossistêmicos. A umidade do solo é considerada uma variável climática essencial, pois controla a distribuição da radiação solar entre fluxo de calor latente associado aos processos de evaporação e o fluxo de calor sensível, responsável pelo aquecimento do ar e das camadas superficiais do solo (de Moraes Danelichen; Biudes, 2011).

A presença de água influencia de maneira direta as propriedades térmicas do solo. O aumento da umidade eleva tanto a capacidade térmica volumétrica quanto a condutividade térmica, à medida que a água substitui o ar nos poros do solo, aumentando a condução de calor (Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003). Em períodos de seca, o ar presente nos poros reduz a condutividade térmica e aumenta a amplitude térmica superficial, intensificando o aquecimento diurno e o resfriamento noturno (Costa, 2023).

O gradiente térmico também pode induzir o movimento de água no solo, tanto na forma líquida quanto na forma de vapor, resultando em alterações no teor de umidade e por consequência as trocas de energia. Esse acoplamento termo-hídrico é essencial para compreender a evolução da temperatura no perfil do solo, pois a redistribuição hídrica controla as variações interanuais de temperatura e a espessura da camada ativa, especialmente em regiões frias ou de baixa umidade (Bense; Kooi, 2004; Schuh; Frampton; Christiansen, 2017).

Além dos processos físicos, a temperatura do solo exerce controle direto sobre processos biológicos, especialmente na zona superficial, onde ocorre maior atividade radicular. Estudos indicam que o crescimento, a respiração e a mortalidade de raízes finas respondem de forma sensível às variações térmicas, exibindo aumento de atividade até atingir um valor ótimo de temperatura, que pode variar entre espécies (Pregitzer *et al.*, 2000). A forte sazonalidade observada no comportamento das raízes, com crescimento mais intenso na primavera e maior

mortalidade no outono, está estreitamente relacionada às oscilações térmicas do solo, reforçando a importância ecológica das camadas superficiais para os processos de ciclagem de carbono e dinâmica da vegetação.

Em ambientes úmidos, como o Pantanal e suas áreas de transição com o Cerrado, a lâmina d'água superficial desempenha papel regulador sobre a dinâmica térmica. Durante o período de inundação, a água atua como isolante térmico, reduzindo as oscilações diárias da temperatura e minimizando o fluxo de calor entre a superfície e o subsolo (de Moraes Danelichen; Biudes, 2011). A energia absorvida pela água é transferida de forma lenta para as camadas inferiores, diminuindo o gradiente térmico e estabilizando o perfil de temperatura durante o período alagado (Curado *et al.*, 2013; Zimmer *et al.*, 2023).

Essas interações demonstram que a dinâmica térmica do solo não pode ser compreendida isoladamente de sua condição hídrica. Em ecossistemas tropicais e sazonalmente inundáveis, medições contínuas em múltiplas profundidades se tornam indispensáveis para capturar adequadamente os efeitos combinados de variações de umidade e temperatura. Nesse contexto, sistemas de monitoramento de alta resolução, oferecem uma base instrumental para caracterizar a variabilidade térmica vertical e aprimorar estimativas de fluxo de calor no solo e balanço de energia em regiões complexas.

2.4 Monitoramento e Instrumentação

O monitoramento da temperatura do solo requer medições contínuas, precisas e confiáveis ao longo do tempo, especialmente em estudos ambientais e micrometeorológicos. Nas últimas décadas, o avanço das tecnologias digitais, aliado à disseminação de microcontroladores de baixo custo e plataformas abertas de aquisição de dados, permitiu a expansão de sistemas de monitoramento ambiental mais acessíveis, flexíveis e escaláveis (Levintal *et al.*, 2021; Lloret *et al.*, 2021; Placidi *et al.*, 2021; Zaszewski; Gruszczyński, 2023).

Entre as soluções disponíveis, os sensores digitais têm se destacado por sua simplicidade de operação, estabilidade metrológica e compatibilidade com sistemas embarcados. Dentre eles, o DS18B20, da *Maxim Integrated*, tornou-se amplamente utilizado devido ao seu baixo custo, e precisão típica de $\pm 0,5$ °C e facilidade de integração com microcontroladores como *Arduino*, *Raspberry Pi* e *ESP32* (Koestoer *et al.*, 2019; MAXIM INTEGRATED, 2015). O sensor opera por meio do protocolo de comunicação *1-Wire*, permitindo que múltiplos dispositivos sejam conectados a um único barramento de dados, cada um identificado por um código ROM único. Essa característica viabiliza arquiteturas multiponto com dezenas de sensores instalados ao longo de um mesmo cabo, sendo ideal para perfis verticais de temperatura do solo.

Nos últimos anos, essa configuração tem sido amplamente aplicada em sistemas ambientais baseados em IoT, inclusive em estações climatológicas de regiões tropicais, demonstrando robustez operacional em condições de alta variabilidade térmica (Manurung et al., 2023). A Figura 2 apresenta um esquema conceitual de um sistema de monitoramento térmico baseado em sensores digitais DS18B20 conectados em barramento 1-Wire a um microcontrolador responsável pela aquisição, armazenamento e transmissão dos dados.

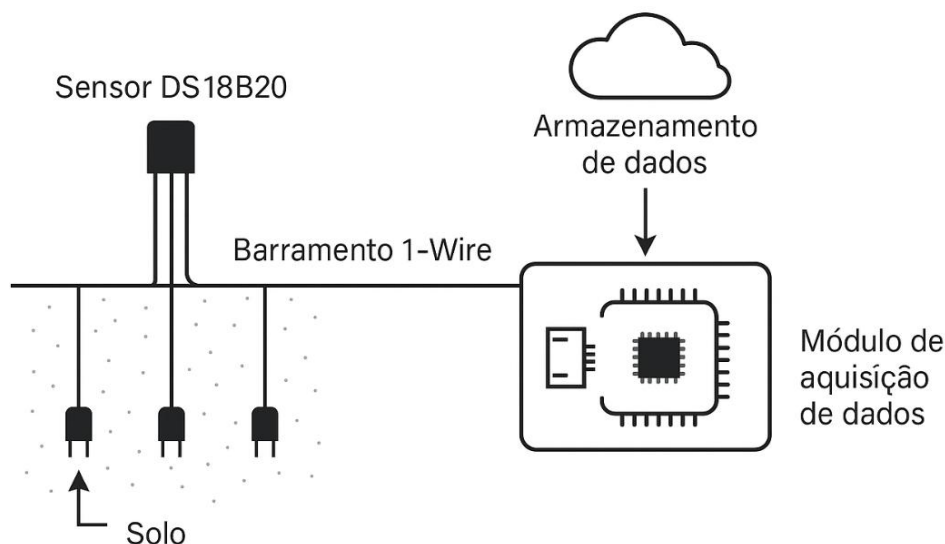


Figura 2. Esquema conceitual de um sistema de monitoramento térmico do solo conectados em barramento 1-Wire a um módulo de aquisição de dados.

Fonte: Adaptado de Manurung et al. (2023); Koestoer et al. (2019); Maxim Integrated (2015).

A precisão típica do DS18B20 pode ser aprimorada por meio de calibração individual em banho térmico com sensor de referência. Estudos demonstram que esse procedimento reduz o erro para valores inferiores a $\pm 0,1$ °C, tornando o sensor adequado para aplicações ambientais que exigem alta sensibilidade térmica, como balanço de energia e estimativa do fluxo de calor no solo pela Lei de Fourier (Elyounsi; Kalashnikov, 2021; Romio *et al.*, 2022; Van Loon; Bastings; Moors, 1998).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre diferentes tipos de sensores de temperatura empregados em estudos ambientais, destacando suas principais características. Observa-se que, embora sensores RTD e termistores apresentem maior precisão intrínseca, o DS18B20 oferece excelente relação custo-benefício, simplicidade de operação e facilidade de implementação em sistemas multipontos.

Tabela 1. Comparação entre diferentes tipos de sensores de temperatura utilizados em estudos ambientais.

Tipo de sensor	Faixa típica de operação (°C)	Precisão declarada	Saída / Interface	Custo e complexidade	Vantagens principais	Limitações / Desvantagens
DS18B20 (1-Wire digital)	-55 a +125	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-10 a +85 °C); após calibração: até $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Digital (protocolo 1-Wire)	Baixo custo; fácil integração	Comunicação simplificada; permite múltiplos sensores em um único barramento; ideal para redes IoT ambientais	Requer calibração individual; sensível a interferências eletromagnéticas em longos cabos
Termistor (NTC)	-50 a +150	$\pm 0,1\text{ a } \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (em faixa restrita)	Analógica (variação de resistência)	Médio; requer circuito de acondicionamento	Alta sensibilidade térmica; boa resposta dinâmica; adequado para medições precisas de curto alcance	Necessita calibração rigorosa; baixa linearidade; instável fora da faixa ótima de operação
RTD (PT100 / PT1000)	-200 a +850	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou melhor (conforme classe)	Analógica (resistiva)	Alto; necessita circuito especializado	Excelente estabilidade e linearidade; alta precisão a longo prazo	Custo elevado; instalação mais complexa; requer compensação de cabos e ruído térmico
Termopar (tipo T / K)	-200 a +1250	$\pm 1\text{ a } \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	Tensão analógica ($\mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$)	Médio a alto	Grande faixa de medição; robustez mecânica; boa resposta térmica	Requer amplificação e compensação de junta fria; menor precisão em variações de baixa amplitude térmica

A implementação de sondas multiponto, com sensores instalados em profundidades conhecidas, possibilita a análise detalhada da propagação da onda térmica no solo, estimar o atraso de fase das oscilações térmicas e determinar parâmetros como a profundidade de zero amplitude anual (DZAA), onde as variações sazonais deixam de ocorrer (Baker; Baker, 2002). Esse tipo de configuração instrumental é particularmente útil em ambientes tropicais e de transição, onde a variabilidade térmica e hídrica exige observações contínuas e de alta resolução vertical.

Dessa forma, a combinação de sensores digitais, de sistemas microcontrolados e procedimentos de calibração em ambiente controlado constitui uma abordagem eficiente e de excelente custo-benefício para o monitoramento térmico do solo. Essa estratégia tem se mostrado eficaz, contribuindo para a validação de modelos de balanço de energia, análise da dinâmica térmica e aprimoramento das estimativas de fluxo de calor no solo (Manurung *et al.*, 2023; Romio *et al.*, 2022).

Na prática, a calibração consiste na comparação direta entre as leituras dos sensores digitais DS18B20 e as de um sensor de referência, realizadas em ambiente controlado sob condições estáveis. Essa etapa permite identificar e corrigir pequenas variações individuais de resposta térmica por meio de equações de ajuste obtidas pela regressão linear, reduzindo erros sistemáticos e garantindo coerência entre os sensores. Esse procedimento assegura que todos os sensores operem dentro de uma mesma escala térmica, conferindo uniformidade e confiabilidade metrológica ao conjunto instrumental empregado no monitoramento da temperatura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste estudo compreendeu o desenvolvimento, calibração e instalação em campo de uma sonda multiponto destinada ao monitoramento da temperatura do solo em diferentes profundidades. O processo envolveu as etapas de construção e montagem do sistema de hardware, o desenvolvimento do software de aquisição, a calibração dos sensores em ambiente controlado e a instalação definitiva na área experimental.

3.1 Desenvolvimento da Sonda Multiponto

O desenvolvimento da sonda multiponto foi realizado de forma integrada entre as etapas de hardware e software, com o objetivo de viabilizar a coleta, o processamento e o armazenamento de dados de temperatura em múltiplos pontos distribuídos ao longo do perfil vertical do solo.

3.1.1 Configuração do Hardware e Arquitetura do Sistema

Para o sistema de detecção foram selecionados 58 sensores digitais de temperatura modelo DS18B20, amplamente utilizados em aplicações ambientais devido à sua precisão, baixo custo e compatibilidade com o protocolo de comunicação *1-Wire*.

O arranjo de entrada é composto por 58 sensores que foram interligados em um único barramento *1-Wire*, compartilhando o mesmo condutor de dados. A Figura 3 apresenta o diagrama em bloco do sistema, destacando os módulos de entrada (sensores), processamento (microcontrolador/*datalogger*) e armazenamento dos dados. A alimentação elétrica é fornecida por uma fonte de tensão contínua (VCC), responsável por energizar todo o arranjo.

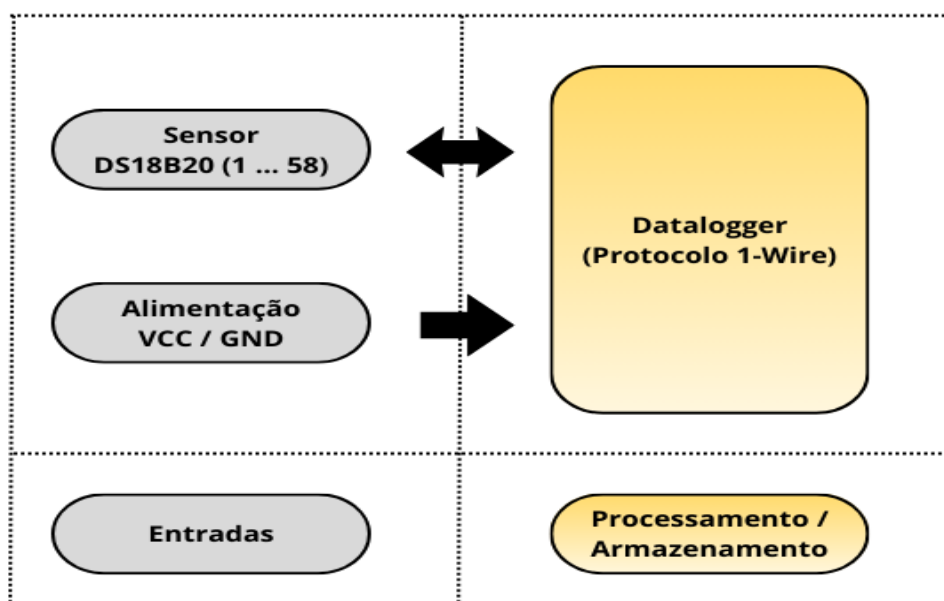


Figura 3. Diagrama em bloco do arranjo da sonda multiponto.

3.1.2 Perfil de Profundidade

A distribuição vertical dos sensores (Figura 4) foi planejada com base no comportamento físico da propagação da onda térmica no solo, com maior resolução onde as variações térmicas são mais intensas. Nas camadas superficiais, as oscilações diurnas e sazonais são mais acentuadas e fortemente influenciadas pela radiação solar, umidade e trocas de energia solo-atmosfera (Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003).

Estudos realizados no Pantanal demonstram que as maiores amplitudes e taxas de variação térmica ocorrem nos primeiros centímetros do solo, justificando o uso de elevada densidade de sensores nessa região. (Costa, 2023; Novais *et al.*, 2013) por exemplo, empregaram medições em profundidades de 0,01 m, 0,07 m, 0,15 m, 0,30 m e 0,50 m, evidenciando a necessidade de alta resolução superficial para capturar adequadamente o fluxo de calor e a dinâmica térmica nessa zona ativa. Assim, a maior densidade de sensores nessa região permite captar com maior precisão o amortecimento térmico e o atraso de fase característicos.

- Camadas Superficiais (Alta Resolução): os oito primeiros sensores foram instalados nas profundidades de 0,02 m, 0,05 m, 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m, permitindo registrar as rápidas mudanças térmicas que ocorrem próximas da superfície.
- Camadas Profundas: os cinquenta sensores restantes foram distribuídos em intervalos regulares de 0,20 m, de 0,70 m até a profundidade final de 10,00 m. Em maiores profundidades, a amplitude térmica diminui de forma exponencial e a onda de calor apresenta variações mais suaves, justificando o espaçamento uniforme sem perda de informação científica (Baker; Baker, 2002; Beltrami *et al.*, 2017).

Essa configuração possibilita caracterizar de maneira detalhada tanto as oscilações rápidas das camadas superficiais quanto as variações sazonais das camadas profundas, além de permitir determinar a profundidade de zero amplitude anual (DZAA), frequentemente situada entre 8 e 12 m em ambientes tropicais e de clima sazonal (Teleszewski *et al.*, 2022).

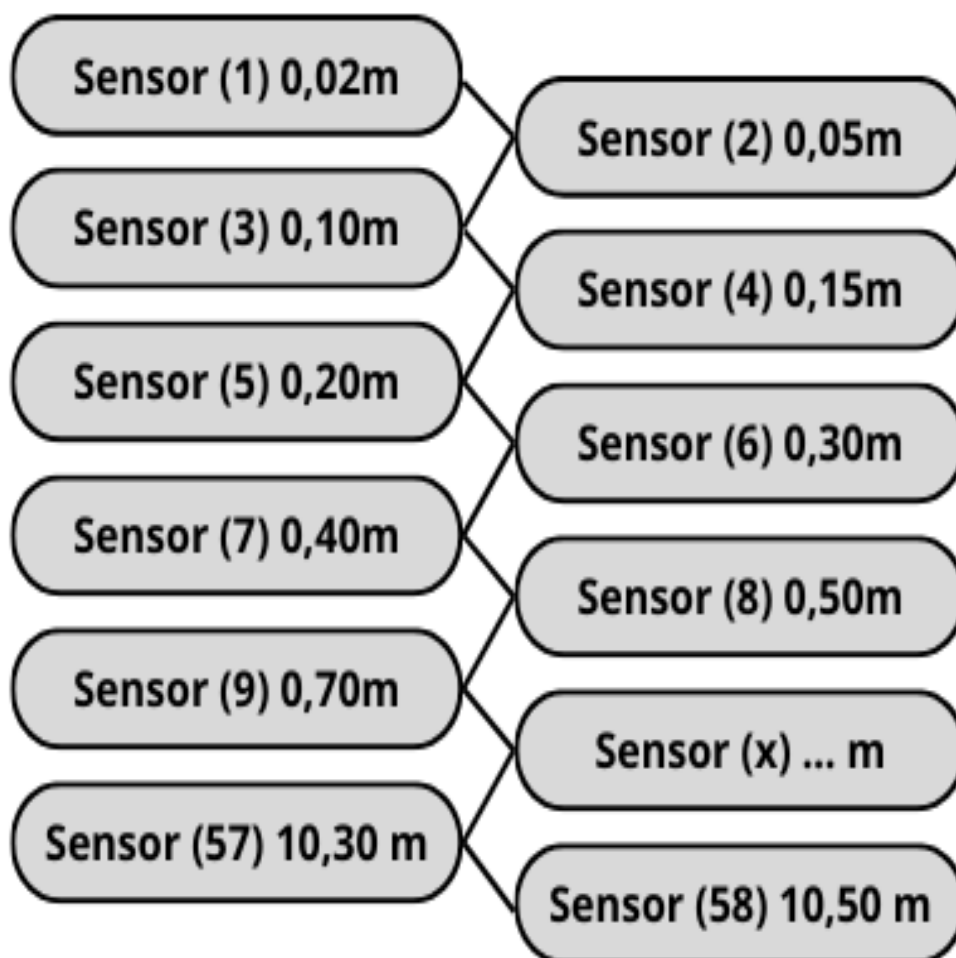


Figura 4. Perfil de profundidade dos sensores da sonda multiponto.

3.1.3 Montagem e Diagrama Elétrico

Na etapa de hardware, cada sensor DS18B20 foi inicialmente testado individualmente em bancada, utilizando uma placa protoboard (Figura 5) para verificar seu funcionamento e registrar o código ROM exclusivo de cada um dos 58 sensores.

A comunicação foi estabelecida via protocolo *1-Wire*, utilizando um resistor de 2,2 k Ω como *pull-up* entre o barramento de alimentação (VCC) e o barramento de dados (*DATA*), de modo a garantir a estabilidade no sinal. A Figura 6 apresenta o diagrama elétrico simplificado adotado.

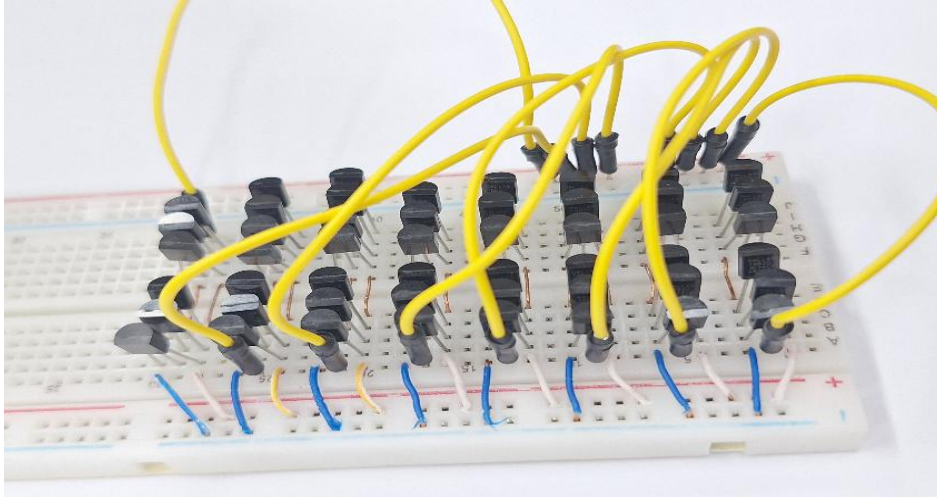


Figura 5. Teste inicial dos sensores montados em placa protoboard.

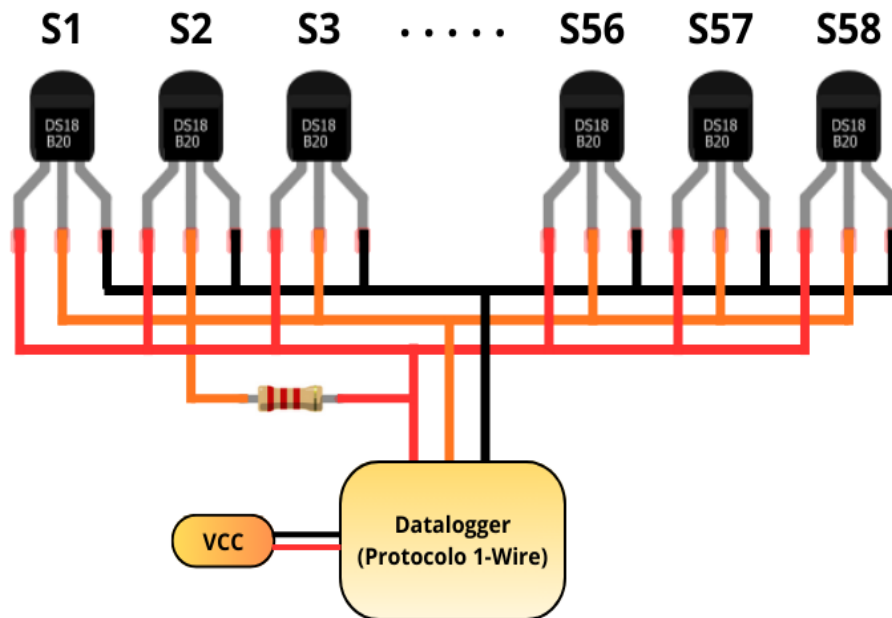


Figura 6. Diagrama elétrico simplificado da sonda multiponto.

3.1.4 Processo de Soldagem e Isolamento

Após a etapa inicial de testes, cada sensor foi submetido individualmente ao processo de soldagem (Figura 7b) e isolamento dos terminais, utilizando fita isolante líquida (QUIMATIC, 2024). Em seguida, os sensores foram então agrupados (Figura 7c) e organizados conforme o perfil de profundidade estabelecido. Após a montagem todo o conjunto foi posteriormente impermeabilizado para garantir resistência mecânica, integridade elétrica e para uma durabilidade em campo.

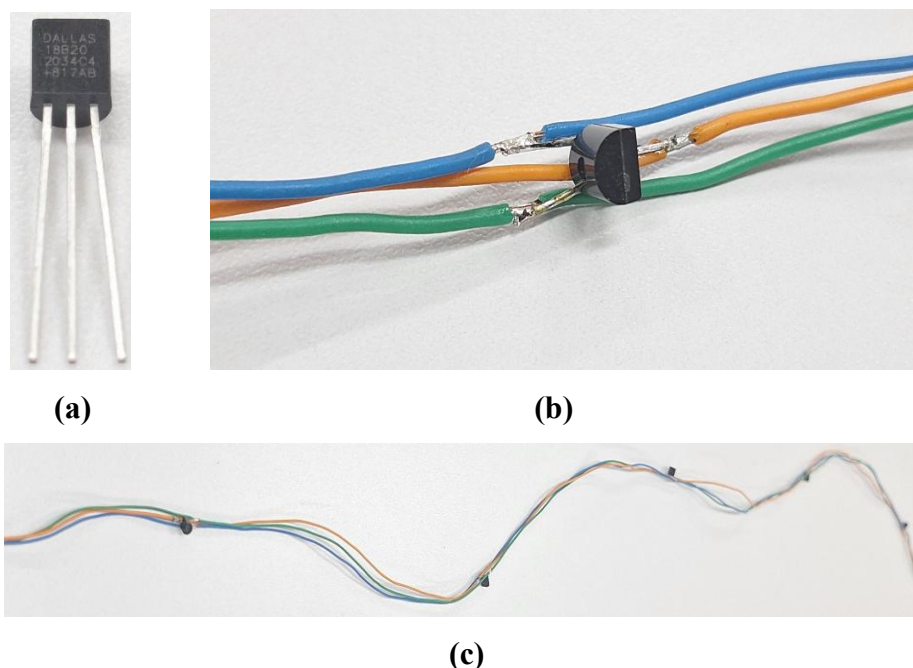


Figura 7. (a) Sensor DS18B20; (b) Processo de soldagem individual; (c) Agrupamento sensores.

3.1.5 Software e Aquisição de Dados

O software de aquisição foi desenvolvido para operar utilizando o protocolo *1-Wire* em uma plataforma de hardware aberta, compatível com protocolo de comunicação dos sensores, sendo dispositivos como *Arduino*, *Raspberry Pi* ou *ESP32*, empregados como unidades de aquisição (*datalogger*). O *datalogger* foi configurado para realizar leituras sequenciais dos 58 sensores em intervalos regulares de um minuto, garantindo simultaneidade lógica, consistência temporal e padronização das medições.

O fluxo operacional completo do software é apresentado na Figura 8, que representa o processo desde a inicialização do sistema até o registro das medições. O diagrama destaca as etapas de inicialização das bibliotecas, detecção dos sensores DS18B20, verificação de integridade das leituras, armazenamento dos dados em CSV e mecanismos de contingência, como reinicialização automática em caso de falhas de leitura.

A rotina de aquisição executa três funções principais:

- Detecção e identificação dos sensores por meio de seus códigos *ROM* exclusivos;
- Leitura sequencial e verificação de integridade das medições;
- Registro automático de data, hora e temperatura em arquivo no formato CSV, assegurando rastreabilidade, compatibilidade com diferentes ferramentas de análise e facilidade de integração com plataformas externas de processamento de dados.

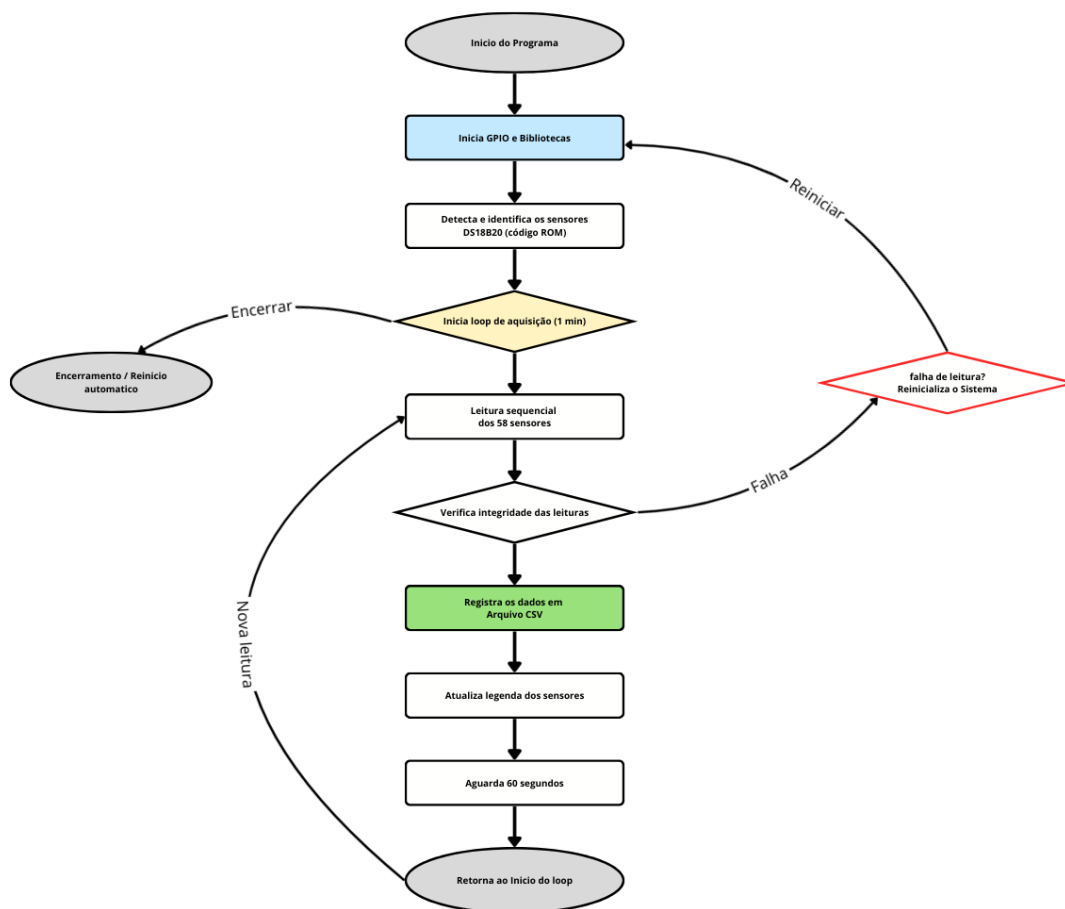


Figura 8. Diagrama de fluxo do software de aquisição da sonda multiponto.

3.1.6 Custo dos Materiais

Para referência técnica e visando documentar a viabilidade econômica do sistema, o custo total dos materiais utilizados na construção da sonda multiponto e do módulo de aquisição de dados está distribuído na Tabela 2. Ressalta-se que esse custo se refere exclusivamente aos materiais empregados na montagem do sistema, não abrangendo despesas operacionais relativas para perfuração, ferramentas ou mão de obra. Essa informação reforça o caráter de baixo custo e replicabilidade da sonda proposta.

Tabela 2. Custo dos materiais da Sonda de temperatura multiponto.

Material	Qtde	Valor unitário	Total
DS18B20	58	4,89	283,62
Placa de desenvolvimento	1	245,90	245,90
Fonte alimentação	1	77,21	77,21
Isolamento elétrico 50g	1	26,95	26,95
Impermeabilização 50g	8	16,00	128,00
Cabo de interligação 10m	2	35,71	71,42
Solda	1	19,12	19,12
			852,22

3.2 Calibração da Sonda Multiponto

A calibração dos sensores foi realizada por meio de um ensaio comparativo em ambiente controlado, conduzido entre as 14:00 h do dia 21 e as 08:00 h do dia 25 de agosto de 2025.

3.2.1 Procedimento de Ensaio

Durante o experimento, todos os 58 sensores da sonda foram submersos simultaneamente em um banho térmico contendo água e gelo (Figura 9). A temperatura do ensaio variou aproximadamente de 0 °C até a temperatura ambiente de ± 30 °C.

Como referência, foi utilizado o sensor CS108 fabricado pela *Campbell Scientific*, posicionado no mesmo meio térmico da sonda. As leituras foram adquiridas simultaneamente pelo *datalogger* da sonda e para o sensor de referência pelo *datalogger* CR1000 da *Campbell Scientific*.

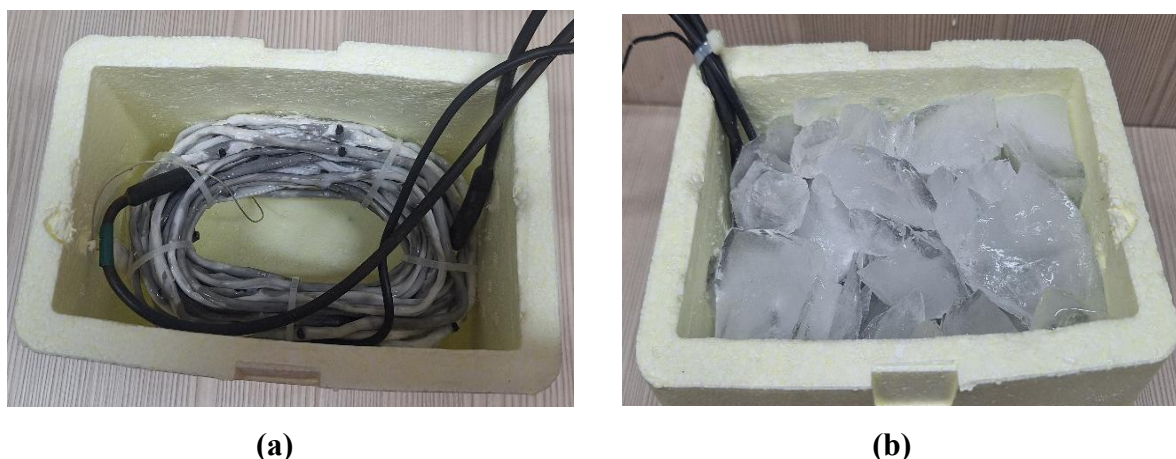


Figura 9. (a) Preparação da sonda multiponto para calibração junto ao sensor de referência; (b) Sonda e sensor de referência submersos em banho térmico.

3.2.2 Análise Estatística

Os dados obtidos foram analisados estatisticamente por meio das seguintes métricas:

- Regressão Linear: Utilizada para modelar a relação entre as leituras da sonda e do sensor de referência, resultando nos coeficientes angular (a) e linear (b) utilizados para o ajuste individual de cada sensor (Montgomery; Peck; Vining, 2021).
- Erro Absoluto Médio (MAE): Para quantificar as diferenças entre as leituras da sonda e do sensor de referência, antes e após a correção.
- Coeficiente de Determinação (R^2): Para avaliar a consistência e a força da correlação linear.

A etapa de calibração foi fundamental para reduzir incertezas, eliminar desvios sistemáticos e assegurar a confiabilidade das medições, aspectos fundamentais em estudos ambientais que dependem de estimativas precisas de fluxo de calor no solo (Elyounsi;

Kalashnikov, 2021; Koestoer *et al.*, 2019; Manurung *et al.*, 2023; Todd *et al.*, 2025; Van Loon; Bastings; Moors, 1998; Zaszewski; Gruszczyński, 2023).

3.3 Local de Desenvolvimento e Instalação em Campo

3.3.1 Localização do Estudo

O desenvolvimento da sonda e os testes preliminares foram realizados no Laboratório de Instrumentação do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), campus Cuiabá.

A instalação em campo ocorreu na área experimental do PPGFA, localizada nas coordenadas $15^{\circ}36'31.3''\text{S}$; $56^{\circ}03'48.3''\text{W}$ (Figura 10), situada em uma região de transição Cerrado–Pantanal, com clima tropical sazonal do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Tamayo-Ruíz *et al.*, 2025).

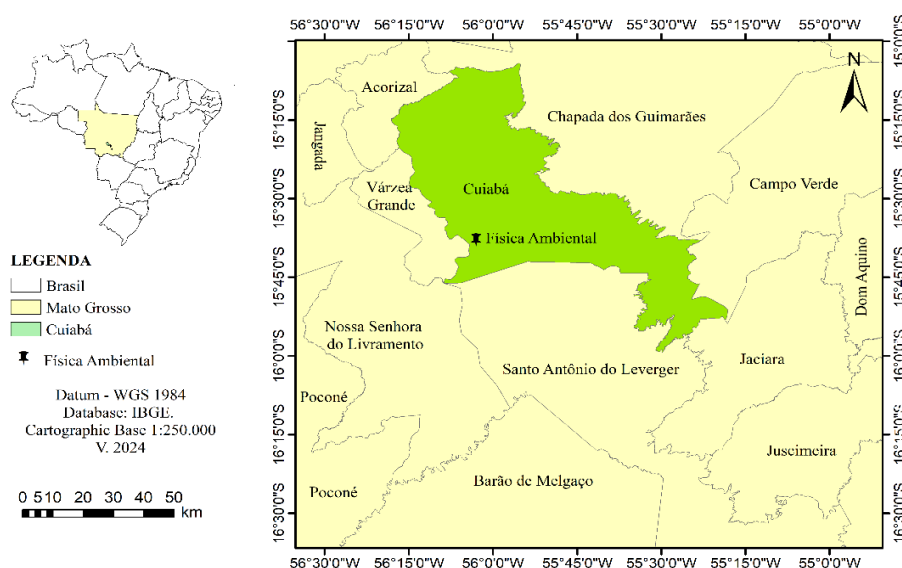


Figura 10. Localização do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA).

3.3.2 Instalação da Sonda no Solo

Após a calibração, a sonda foi instalada no ponto de medição conforme o planejamento inicial (Figura 11b). A perfuração do solo foi realizada com diâmetro aproximado de 10 cm e profundidade de 10,00 m (Figura 11a). Após a inserção da sonda na cavidade, o solo removido foi cuidadosamente recomposto, de modo assegurar o adequado contato térmico entre a sonda e o terreno.



Figura 11. (a) Local da perfuração para instalação da sonda de temperatura multiponto; (b) Sonda instalada no ponto de medição.

3.3.3 Dificuldades Operacionais durante a Perfuração

O processo de perfuração apresentou desafios significativos devido ao perfil geológico e às mudanças nas condições do solo ao longo da profundidade. A perfuração foi realizada com um perfurador de solo à gasolina equipado inicialmente com uma broca de 100 mm, o que permitiu avanço contínuo e sem maiores impedimentos até aproximadamente 4 metros.

Entre 4 e 5 metros, verificou-se a presença de material pedregoso misturado ao solo, reduzindo a eficiência do equipamento. Abaixo dessa camada, observou-se transição para um material do tipo piçarra, indicando variações de compactação e composição e devido ao aumento da resistência mecânica nessa região, tornou-se necessária a substituição da broca original por uma broca de 60 mm, o que possibilitou a continuidade do processo.

Entre 4 e 5 metros, verificou-se a presença de material pedregoso misturado ao solo, reduzindo a eficiência do equipamento. Abaixo dessa camada ocorreu a transição para um material do tipo piçarra, caracterizado por variações de compactação e composição. Devido ao aumento da resistência mecânica nesse trecho, tornou-se necessária a substituição da broca original por uma broca de 60 mm, o que permitiu a continuidade da perfuração.

Entre 6,5 e 7,5 metros, o material tornou-se mais macio, sugerindo maior teor de umidade. No entanto, essa condição resultou no colapso parcial das paredes da perfuração, principalmente nos trechos mais profundos, o que dificultou a manutenção do diâmetro da cavidade. Na sequência, ao atravessar novamente uma camada mais compactada e com presença de pedras, a perfuração continuou com dificuldade até atingir a profundidade máxima de 8,5 metros.

Após aproximadamente uma semana, período destinado à preparação final e organização dos sensores constatou-se que a cavidade havia sofrido um fechamento natural, apresentando profundidade reduzida para 7,1 metros no momento da instalação da sonda.

Para assegurar a instalação integral dos 58 sensores, foi necessário realizar um dobramento controlado da estrutura da sonda, ajustando sua disposição física para acomodação no espaço disponível. Os sensores foram organizados de forma paralela, mantendo as distâncias relativas planejadas e preservando a integridade do perfil térmico vertical projetado.



Figura 12. Processo de perfuração para instalação da sonda de temperatura multiponto.

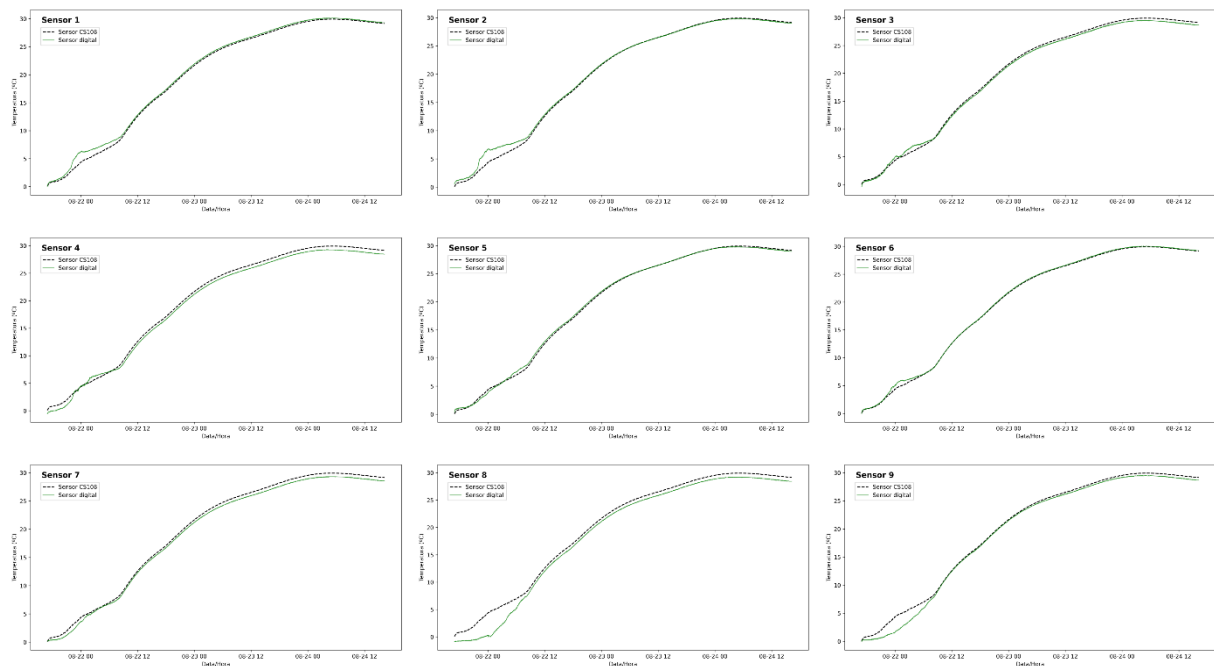
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

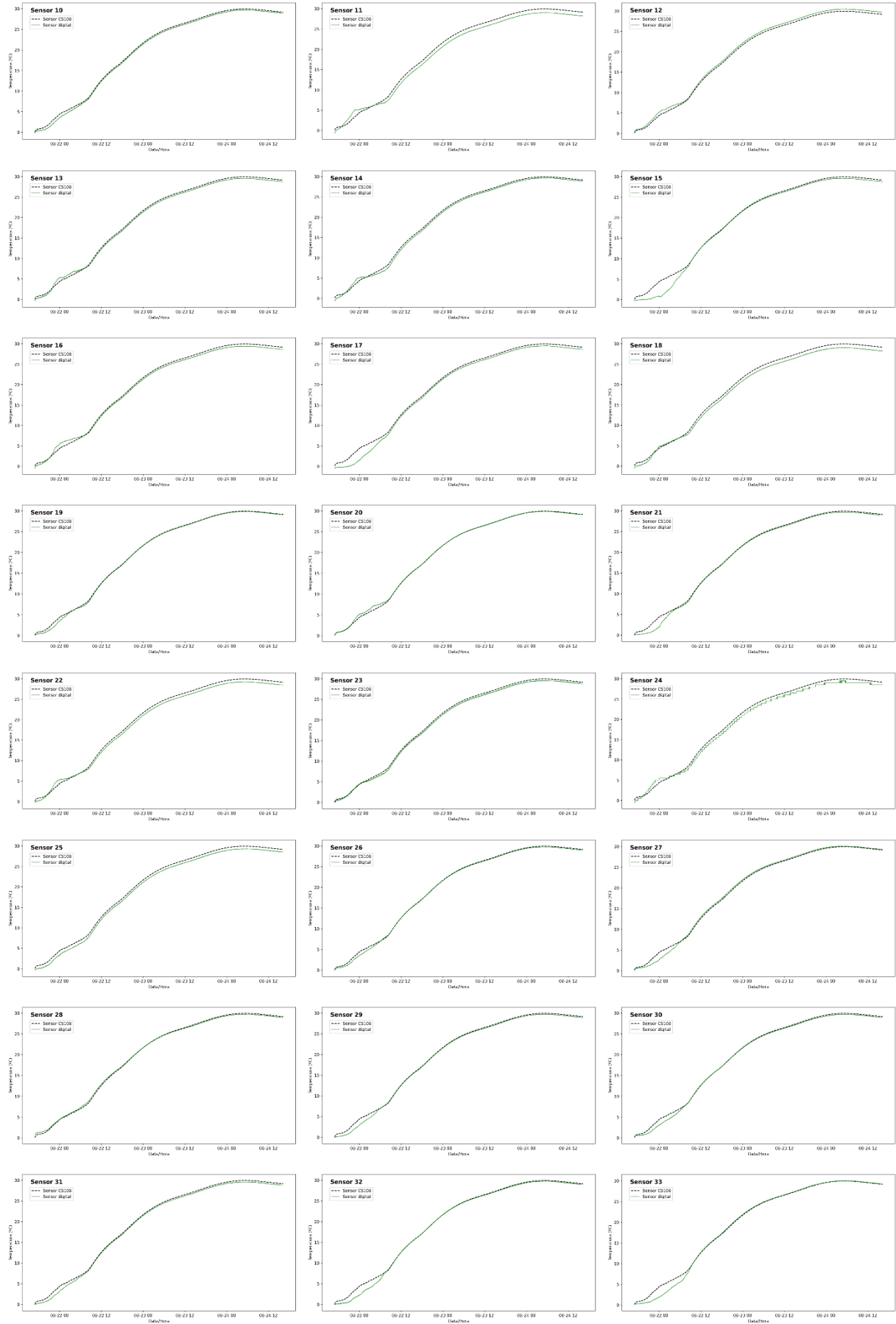
Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos durante o ensaio de calibração da sonda multiponto, comparando as leituras dos 58 sensores digitais DS18B20 com as medições do sensor de referência CS108 em ambiente controlado. As análises incluem a avaliação das relações lineares entre os dispositivos, das métricas estatísticas de erro e correlação e da eficácia dos ajustes aplicados aos sensores após a calibração.

4.1 Comparação entre a Sonda Multiponto e o Sensor de Referência

A Figura 13 apresenta a comparação direta entre as medições da sonda multiponto e do sensor de referência ao longo do ensaio de calibração. De modo geral, é possível observar que os sensores da sonda acompanharam de forma coerente a variação térmica registrada pelo sensor de referência, indicando boa linearidade entre os dispositivos. Esse comportamento é consistente com os resultados relatados por (Elyounsi; Kalashnikov, 2021) e por (Koestoer *et al.*, 2019), que verificaram concordância satisfatória entre sensores DS18B20 e sensores de referência após calibração em banho térmico.

Apesar da boa correspondência geral, alguns sensores apresentaram maior dispersão nas medidas, notadamente os sensores 8, 50 e 58, sugerindo a presença de variações individuais de resposta térmica, diferenças de fabricação ou pequenas diferenças de acoplamento térmico durante o ensaio de calibração.





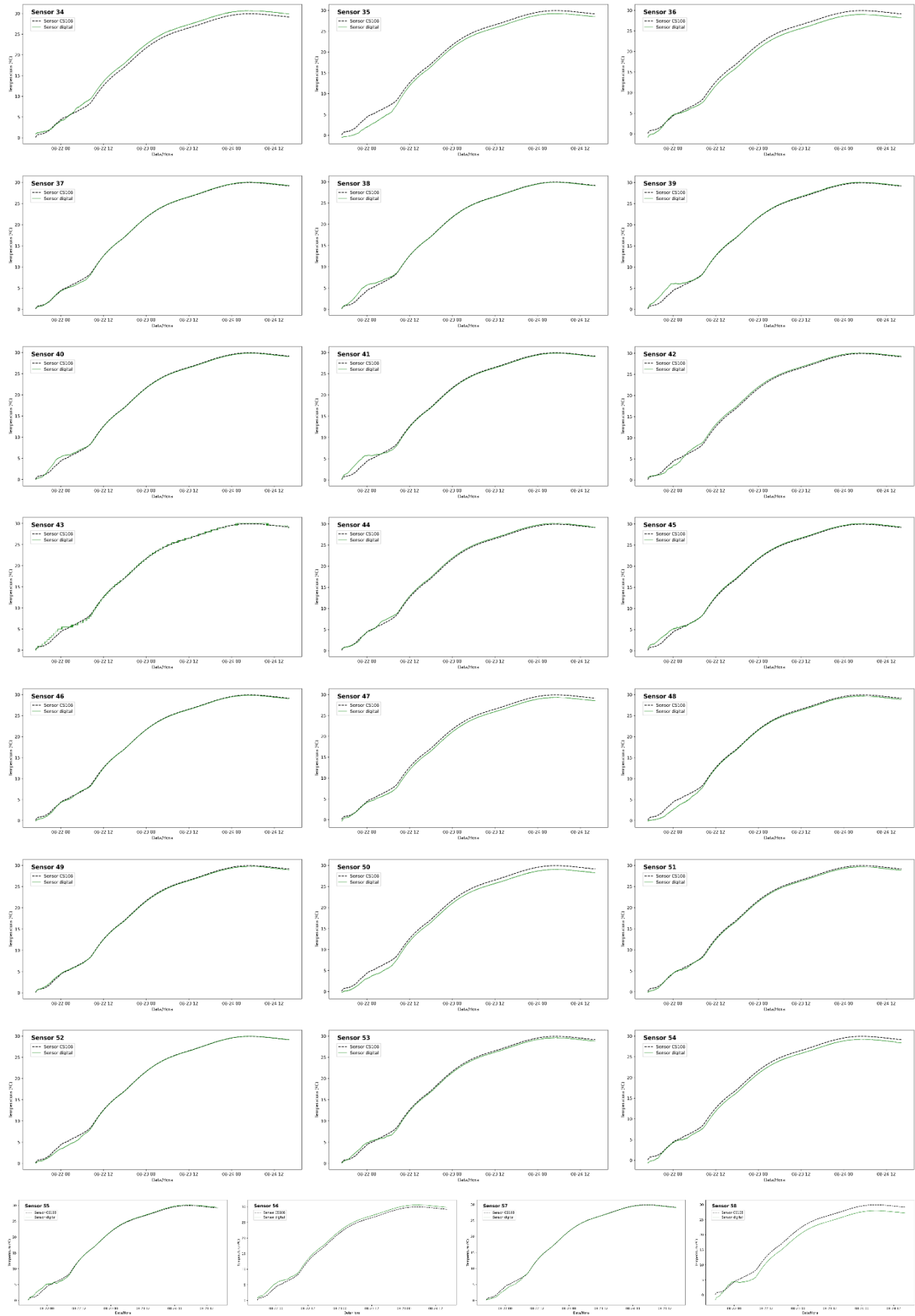


Figura 13. Conjunto de gráficos comparação da sonda multiponto e do sensor de referência (dados medidos).

4.2 Regressão Linear da Sonda Multiponto

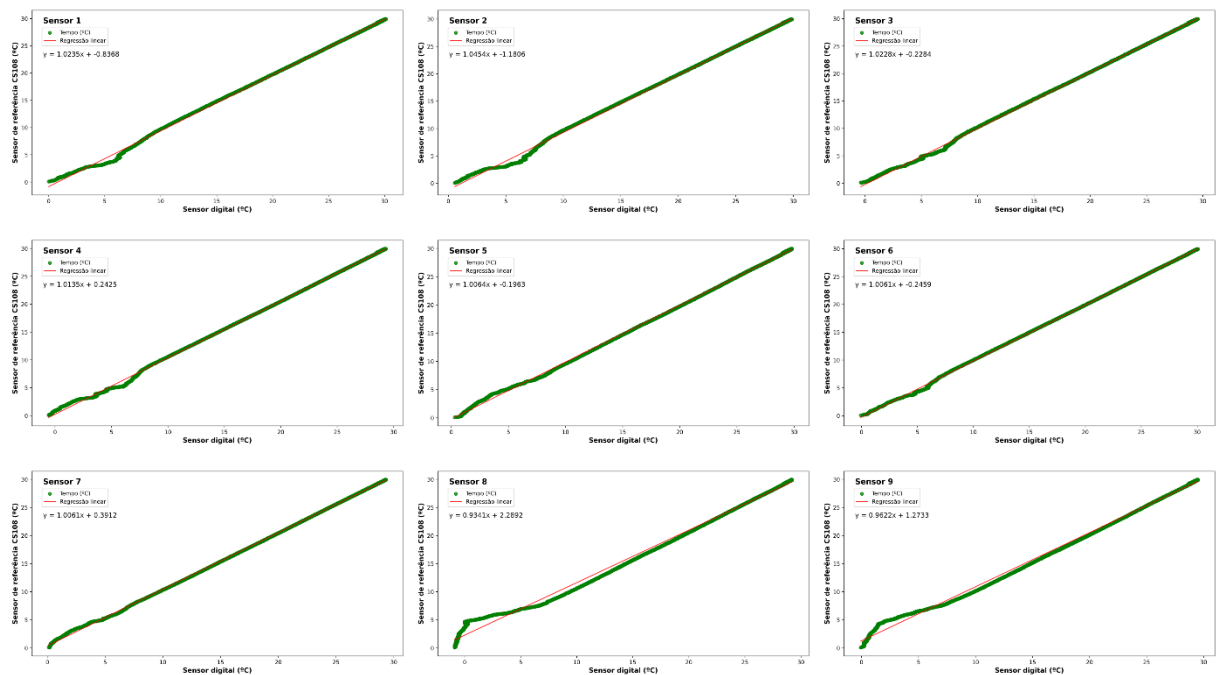
Os resultados da regressão linear indicaram que a maior parte dos sensores apresentou ajuste consistente, com coeficientes angulares (a) e interceptos (b) dentro de faixas estáveis, esse comportamento confirma a proporcionalidade das leituras e a aplicabilidade do modelo linear. A Figura 14 sintetiza os ajustes obtidos, e ilustra o comportamento dos sensores que exibiu maior dispersão inicial.

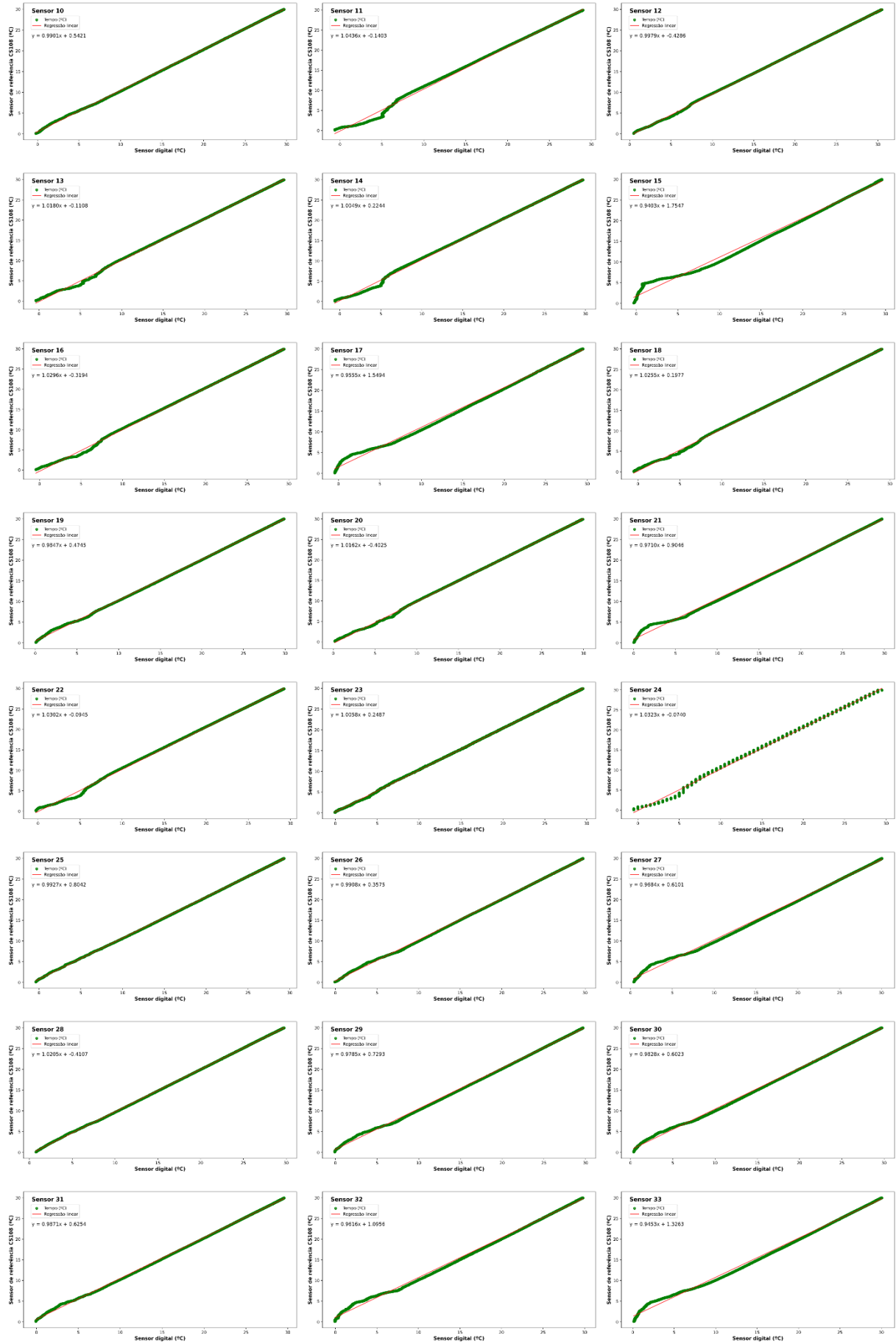
Os coeficientes foram determinados segundo as expressões clássicas de mínimos quadrados para correção de desvios lineares entre sensores e o padrão de referência (Montgomery; Peck; Vining, 2021):

$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n}$$

Mesmo para os sensores que apresentaram maior variação, o modelo linear ajustou adequadamente a relação entre os dados, confirmando a viabilidade de aplicar calibração individual.





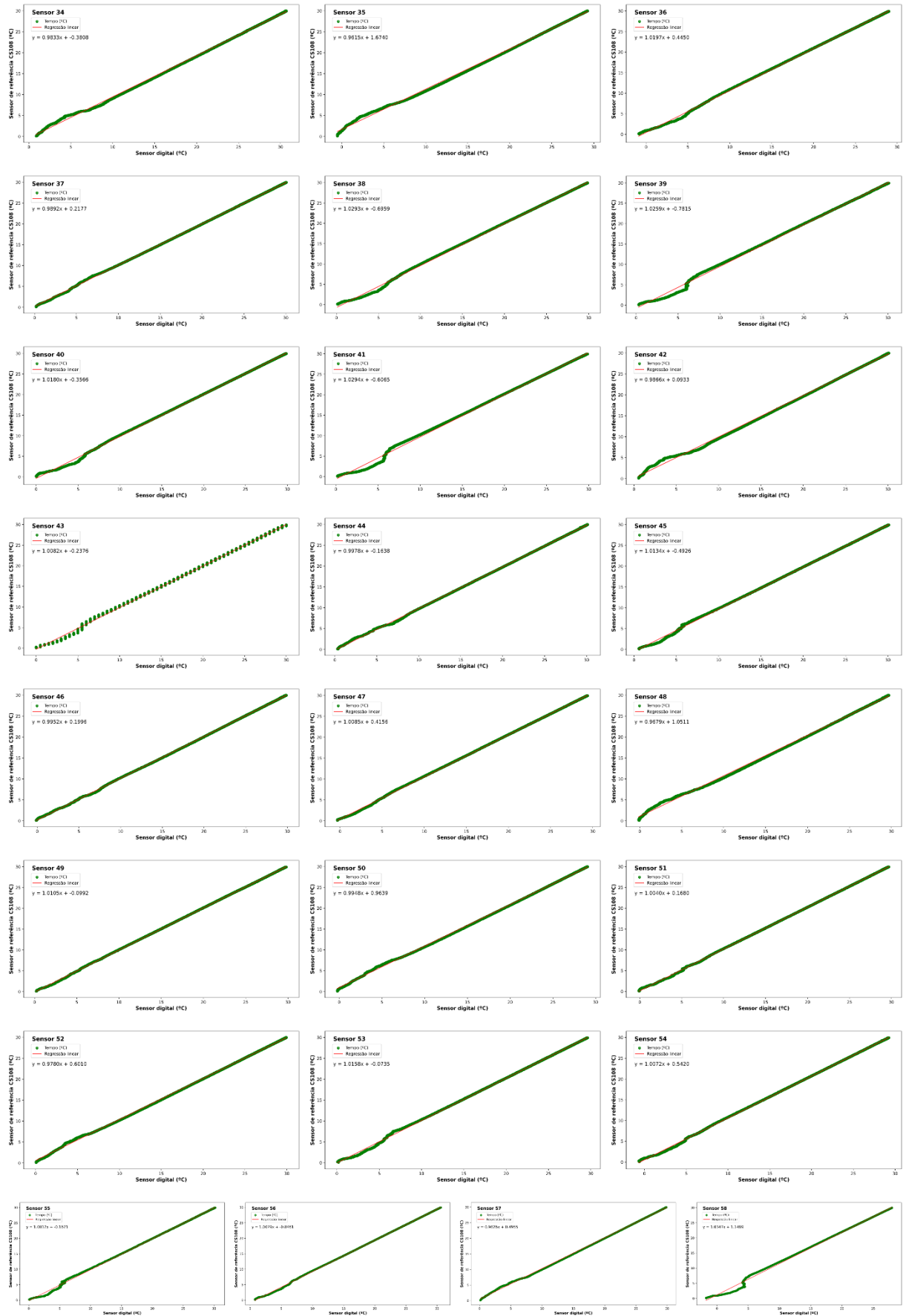


Figura 14. Conjunto de gráficos da Regressão linear da sonda multiponto.

4.3 Avaliação do Erro Absoluto Médio (MAE)

A métrica de Erro Absoluto Médio (MAE) foi utilizada para quantificar a diferença média entre as leituras da sonda multiponto e as do sensor de referência, conforme a expressão:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (3)$$

Essa métrica é amplamente utilizada em estudos ambientais devido à sua robustez estatística e interpretação direta (Willmott; Matsuura, 2005). A Figura 15 apresenta os valores de MAE antes e após o processo de calibração.

A análise mostra redução significativa do erro para a maior parte dos sensores. Em termos médios, o MAE diminuiu de aproximadamente 0,6 °C para 0,18 °C após a calibração.

Sensores com desvios mais acentuados, como o Sensor 58, também apresentaram melhora expressiva, evidenciando a eficácia do ajuste linear individual.

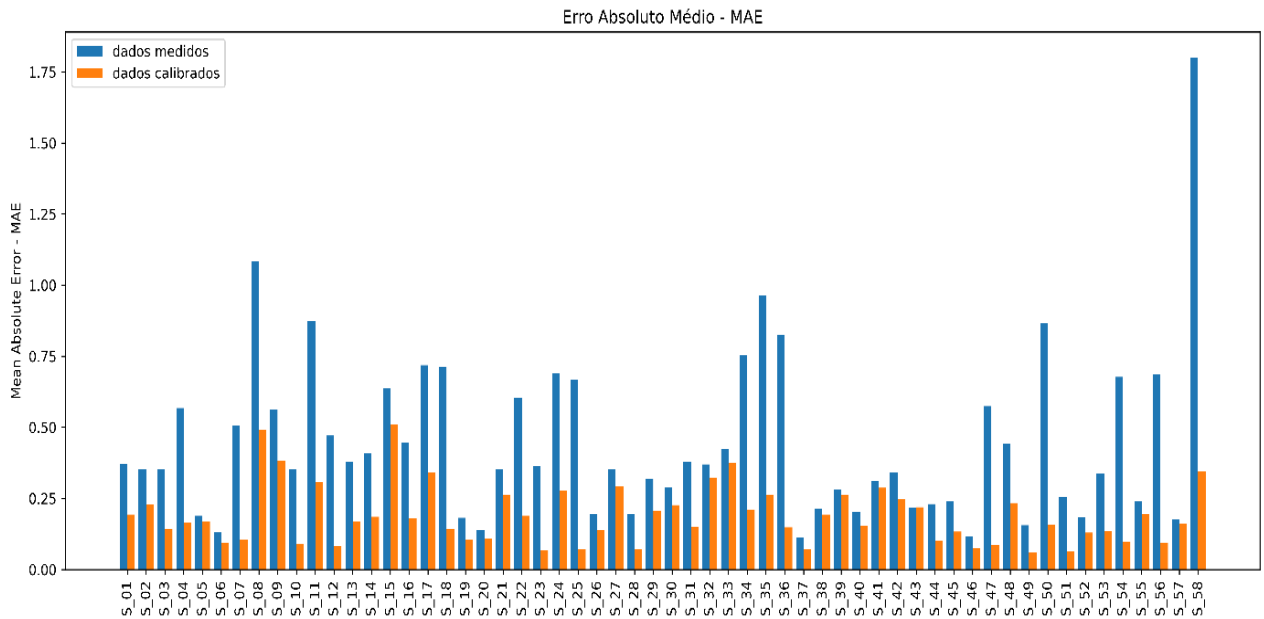


Figura 15. Erro Absoluto Médio (MAE) antes e após a calibração dos sensores.

4.4 Avaliação do Coeficiente de Determinação (R²)

O Coeficiente de Determinação (R²) foi utilizado para avaliar a força da relação linear entre as leituras dos sensores da sonda e do sensor de referência conforme a expressão:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

Valores elevados de R^2 indicam alta correlação entre os conjuntos de dados (Legates; McCabe Jr, 1999), sendo uma métrica fundamental em processos de calibração. A Tabela 3 apresenta os valores de R^2 obtidos para cada sensor, com resultados superiores a 0,99 para a maior parte dos sensores, demonstrando alta correlação linear. Pequenas variações foram observadas em sensores específicos, embora ainda apresentem desempenho satisfatório.

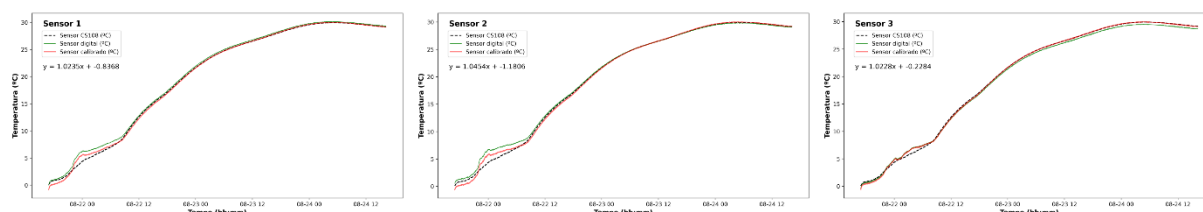
Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2) Sonda multiponto e Sensor de referência.

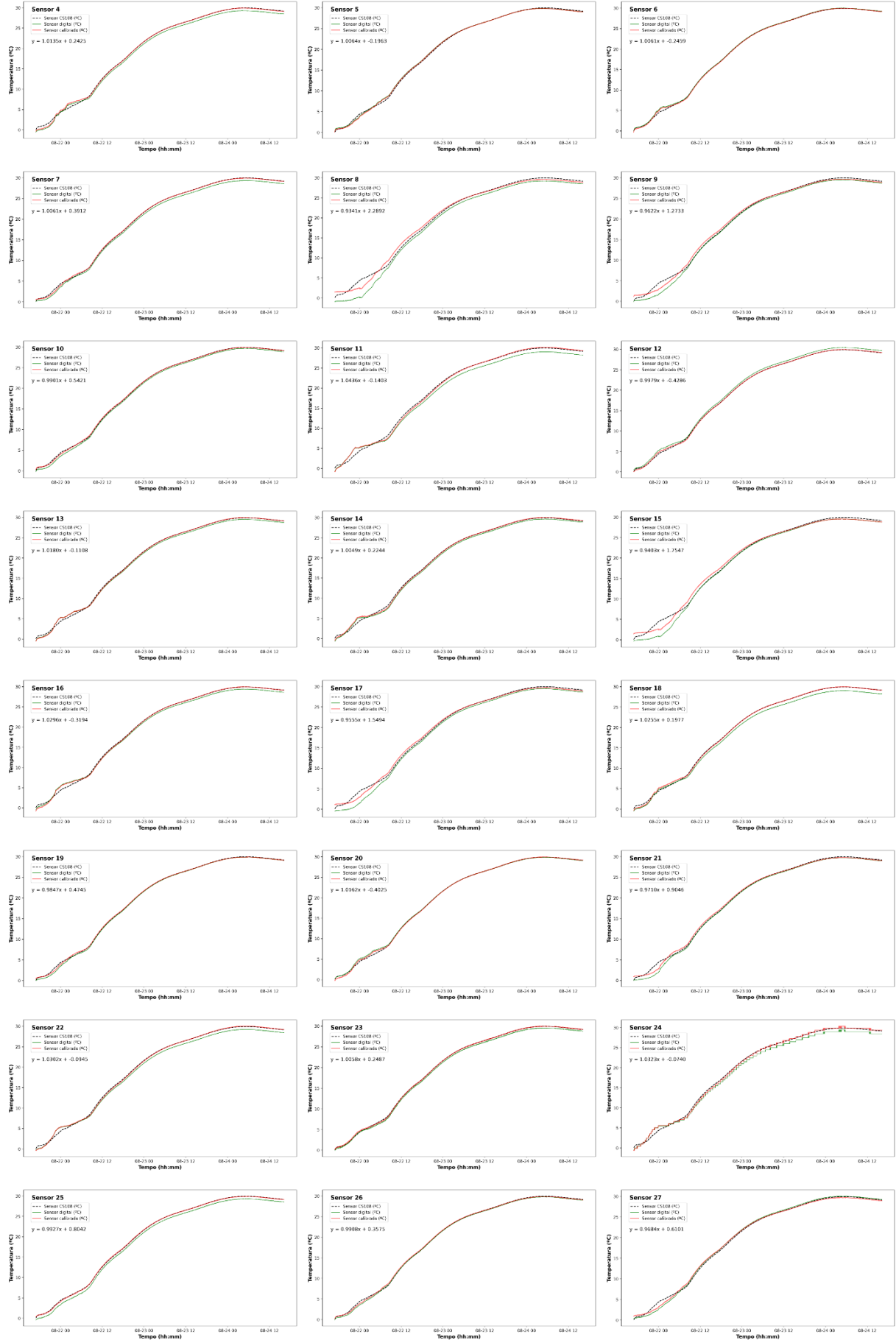
Sensor	R^2	Sensor	R^2	Sensor	R^2	Sensor	R^2
Sensor_1	0.998994	Sensor_16	0.999007	Sensor_31	0.999589	Sensor_46	0.999893
Sensor_2	0.998556	Sensor_17	0.997910	Sensor_32	0.998315	Sensor_47	0.999833
Sensor_3	0.999472	Sensor_18	0.999471	Sensor_33	0.997628	Sensor_48	0.999085
Sensor_4	0.999090	Sensor_19	0.999739	Sensor_34	0.999165	Sensor_49	0.999925
Sensor_5	0.999463	Sensor_20	0.999663	Sensor_35	0.998861	Sensor_50	0.999569
Sensor_6	0.999732	Sensor_21	0.998498	Sensor_36	0.999502	Sensor_51	0.999881
Sensor_7	0.999756	Sensor_22	0.999074	Sensor_37	0.999855	Sensor_52	0.999632
Sensor_8	0.995482	Sensor_23	0.999896	Sensor_38	0.999198	Sensor_53	0.999474
Sensor_9	0.997429	Sensor_24	0.998454	Sensor_39	0.998458	Sensor_54	0.999746
Sensor_10	0.999851	Sensor_25	0.999918	Sensor_40	0.999289	Sensor_55	0.998911
Sensor_11	0.997979	Sensor_26	0.999635	Sensor_41	0.998067	Sensor_56	0.999763
Sensor_12	0.999830	Sensor_27	0.998432	Sensor_42	0.998766	Sensor_57	0.999543
Sensor_13	0.999249	Sensor_28	0.999909	Sensor_43	0.999108	Sensor_58	0.997130
Sensor_14	0.999084	Sensor_29	0.999241	Sensor_44	0.999735		
Sensor_15	0.995233	Sensor_30	0.999111	Sensor_45	0.999487		

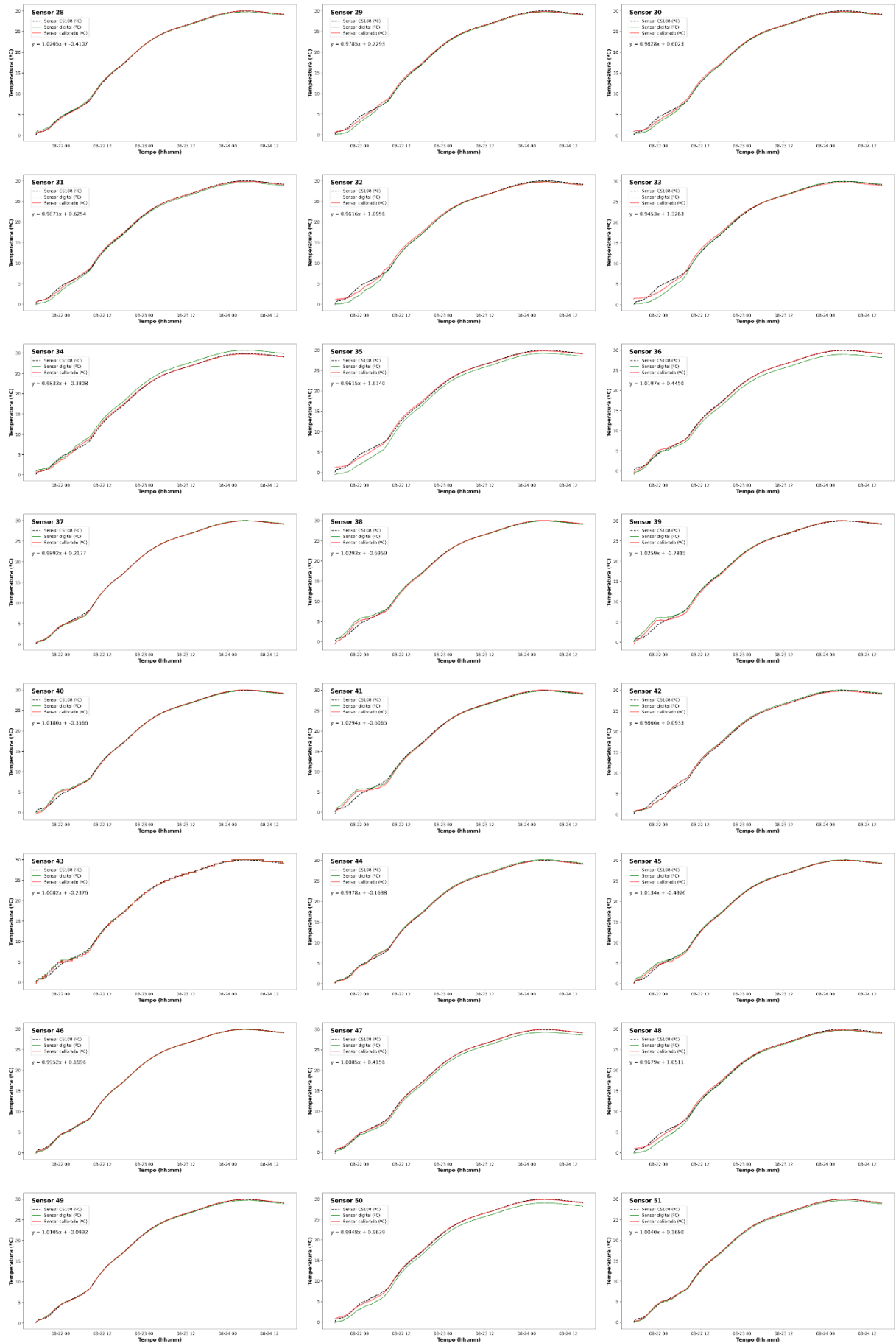
4.5 Comparação Sensor de Referência, Sensor não Calibrado e Sensor Calibrado

A Figura 16 apresenta a comparação entre as curvas do sensor de referência, dos sensores não calibrados e dos sensores calibrados. É observado que a calibração promoveu redução expressiva das diferenças em relação ao padrão, resultando em alinhamento significativo entre as curvas.

O Sensor 58, que apresentou maior dispersão inicial, mostrou melhora significativa após a aplicação do ajuste linear, reforçando a necessidade de correção individual para garantir homogeneidade e confiabilidade no conjunto de medições.







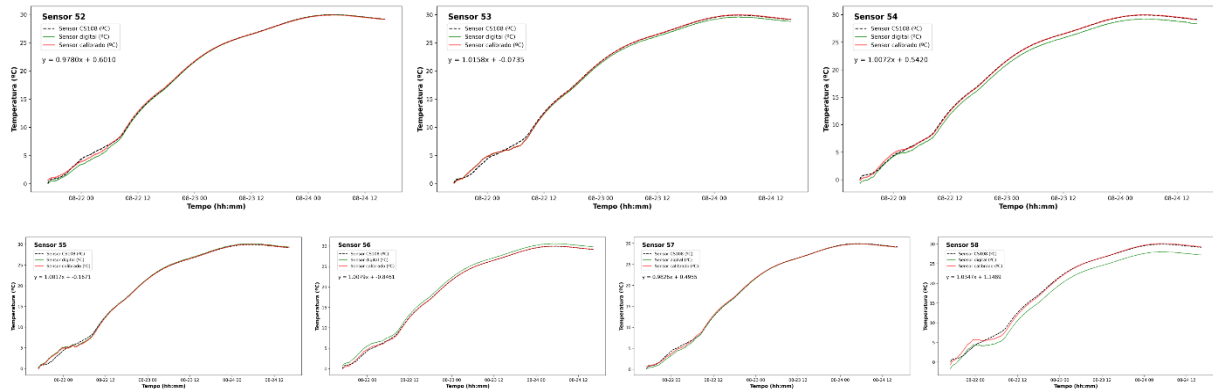


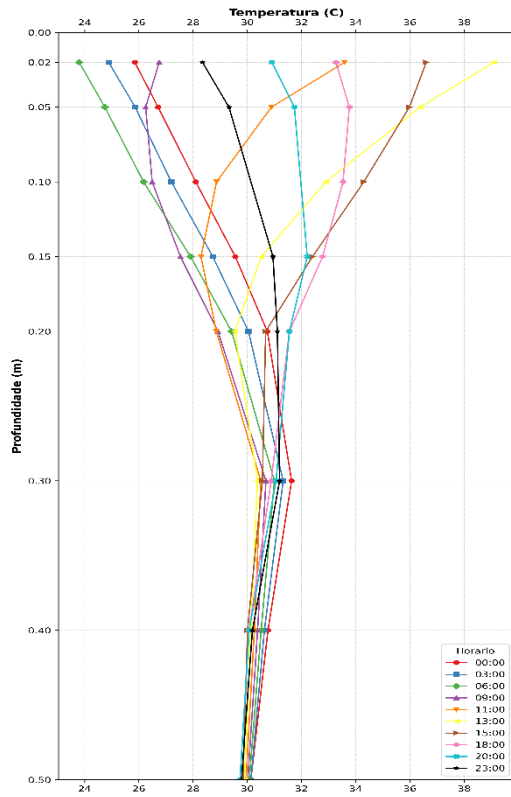
Figura 16. Conjunto de gráficos Comparação entre sonda multiponto, sensor de referência e sensores calibrados.

4.6 Perfis tautócrônicos da temperatura do solo

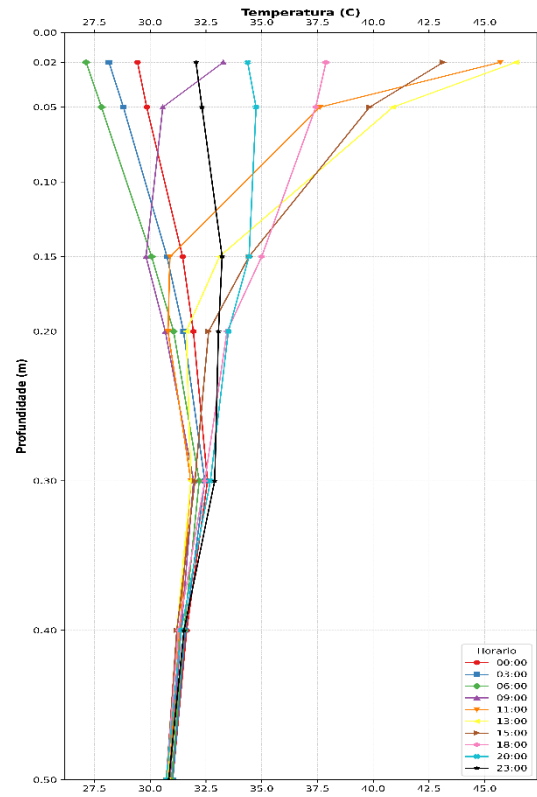
Os perfis tautocrônicos representam a variação vertical da temperatura do solo em diferentes horários ao longo do dia, permitindo observar o comportamento térmico do perfil em função da profundidade e do tempo. Esses perfis foram obtidos a partir dos dados medidos pela sonda multiponto instalada na área experimental do PPGFA/UFMT, em diferentes dias entre setembro e novembro de 2025, abrangendo tanto o início quanto o final do período seco e a transição para o início das chuvas.

A Figura 17 apresenta os perfis tautocrônicos referentes à camada de 0 a 0,50 m, obtidos a partir dos primeiros oito sensores mais superficiais da sonda. Podemos observar que, nas camadas superficiais (até aproximadamente 0,10 m), as amplitudes térmicas são mais elevadas, refletindo a forte influência da radiação solar incidente e da troca de calor com a atmosfera. Entre os horários de 11 h e 15 h, a temperatura máxima ocorre na superfície, com valores entre 35 °C e 40 °C em setembro e 36 °C a 42 °C em outubro e novembro, enquanto as mínimas se observam entre 00 h e 06 h, atingindo 24 °C a 26 °C.

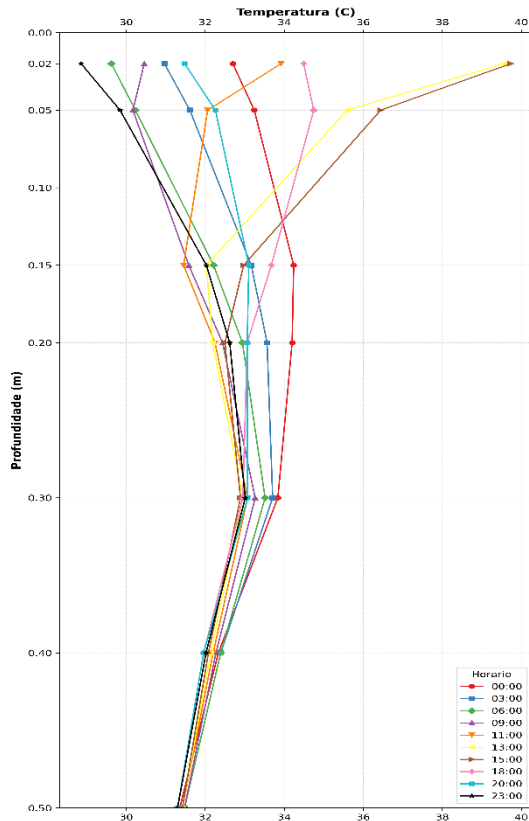
(a) Dia 15/09/2025



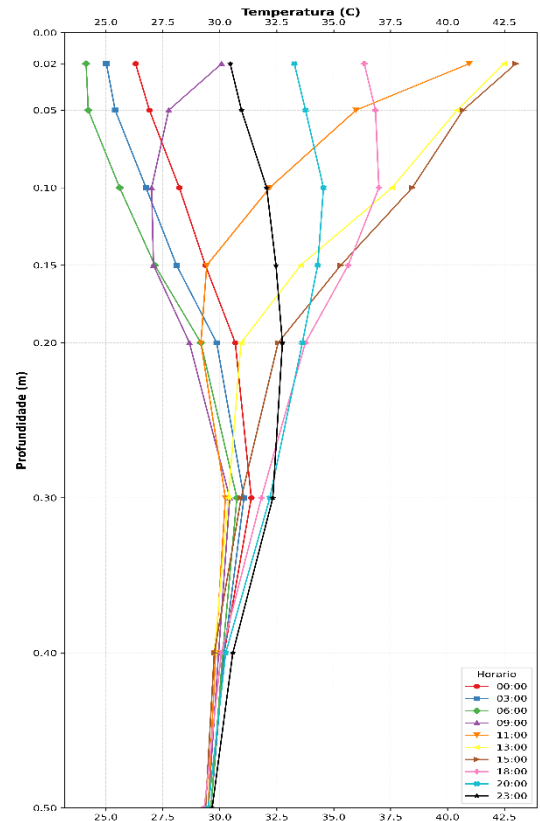
(b) Dia 29/09/2025



(c) Dia 07/10/2025



(d) Dia 21/10/2025



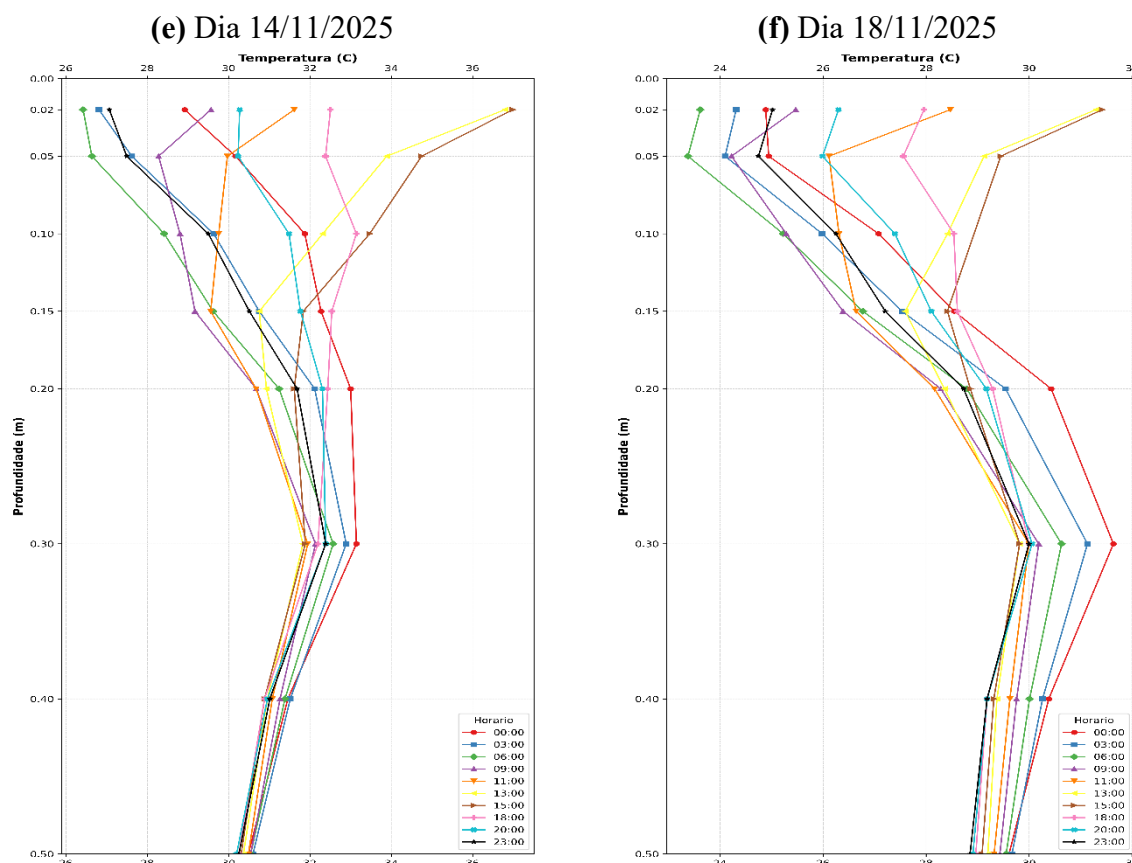
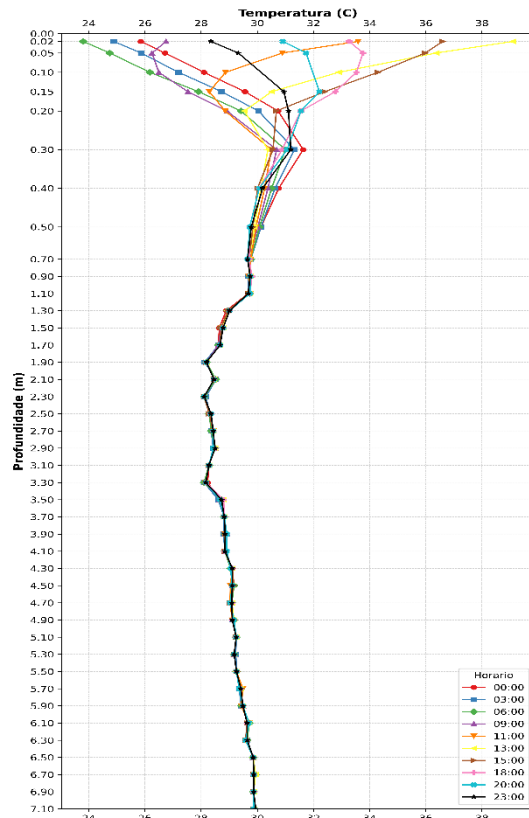


Figura 17. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 0 a 50 cm. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.

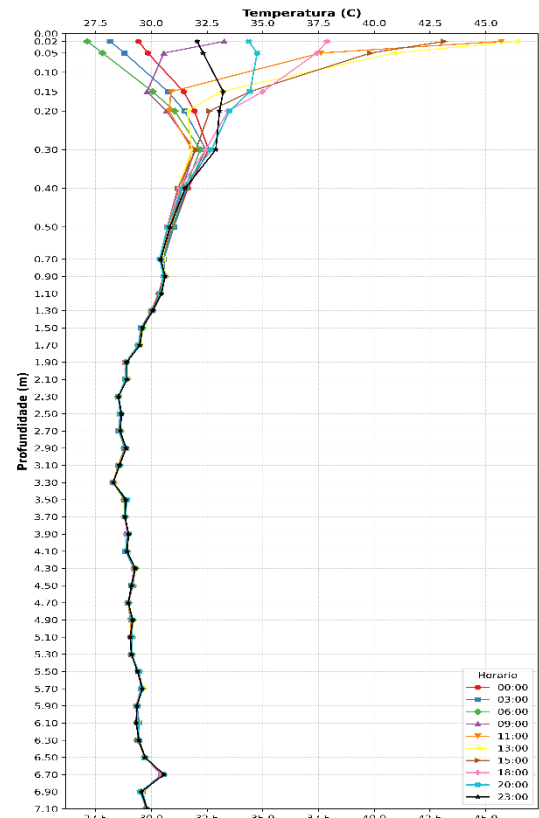
À medida que a profundidade aumenta, a amplitude térmica diminui e o horário de ocorrência da temperatura máxima se desloca para mais tarde no dia, caracterizando o atraso de fase típico da condução térmica em meios porosos. A partir de 0,30 m, as variações diurnas tornam-se suavizadas, e abaixo de 0,50 m o solo apresenta comportamento quase isotérmico no intervalo de 24 h, com temperaturas médias próximas a 30 °C. Esse amortecimento progressivo da oscilação térmica reflete a maior capacidade calorífica volumétrica e a difusividade térmica do solo, que limitam a propagação das ondas de calor em profundidade (Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003).

Na Figura 18 são apresentados os perfis taltocrônicos ao longo de toda a extensão da sonda, abrangendo 0 a 7,10 m de profundidade. Os resultados indicam que abaixo de 1,0 m as flutuações diurnas praticamente desaparecem, prevalecendo um regime térmico estável. Entre 3 m e 7 m as temperaturas se mantêm praticamente constantes entre os diferentes horários do dia, refletindo o balanço entre o fluxo de calor descendente e o armazenamento de energia nas camadas mais profundas.

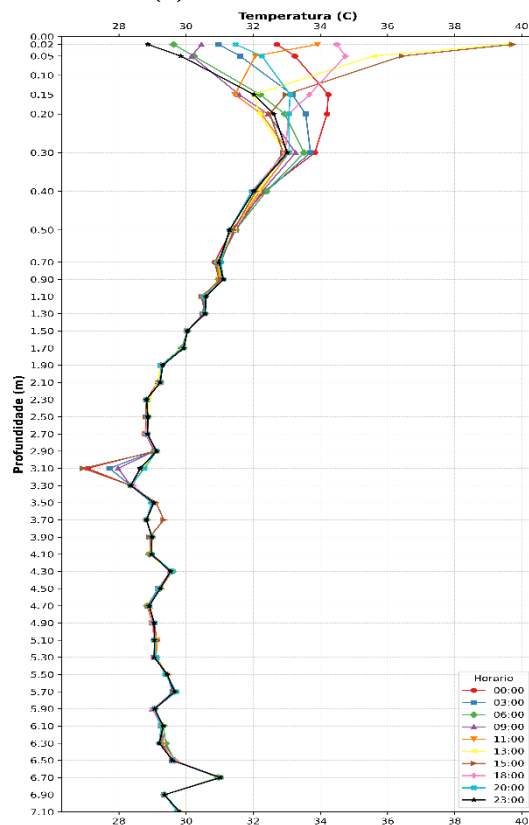
(a) Dia 15/09/2025



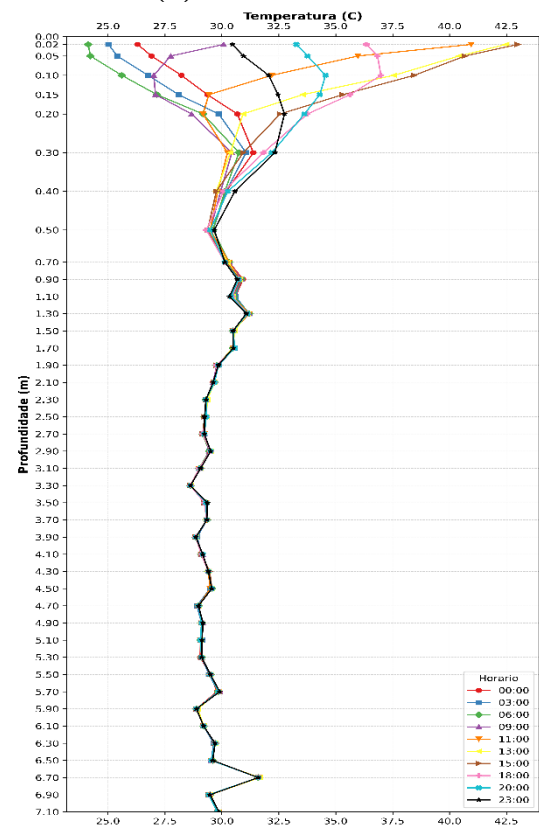
(b) Dia 29/09/2025



(c) Dia 07/10/2025



(d) Dia 21/10/2025



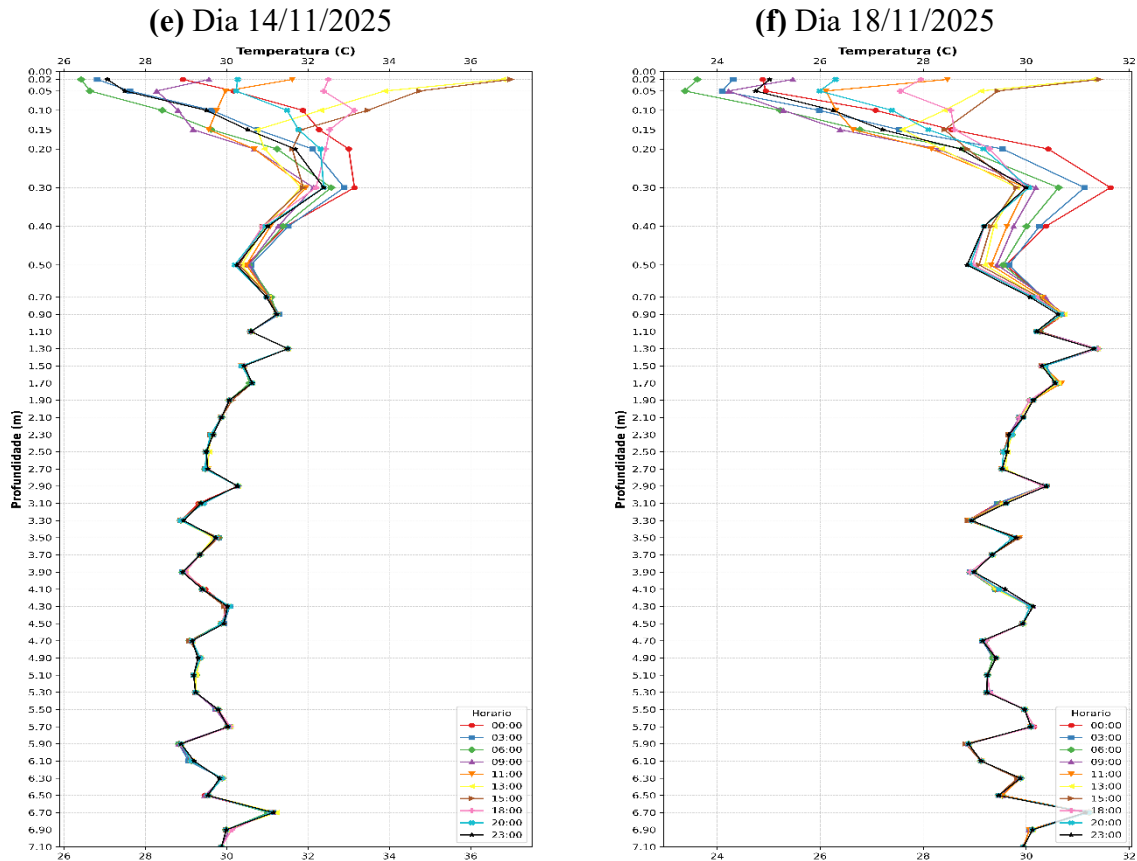


Figura 18. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 0 a 7,10 m. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.

A comparação entre os meses de setembro, outubro e novembro (Figura 19) mostra uma tendência de aquecimento gradual do perfil, coerente com o aumento da temperatura média do ar e com a elevação da temperatura superficial do solo ao longo da transição para o período úmido. Esse comportamento evidencia o avanço da frente térmica sazonal, resultado do acúmulo de energia nos primeiros metros do solo, fenômeno amplamente descrito por (Bristow; Campbell; Calissendorff, 1984).

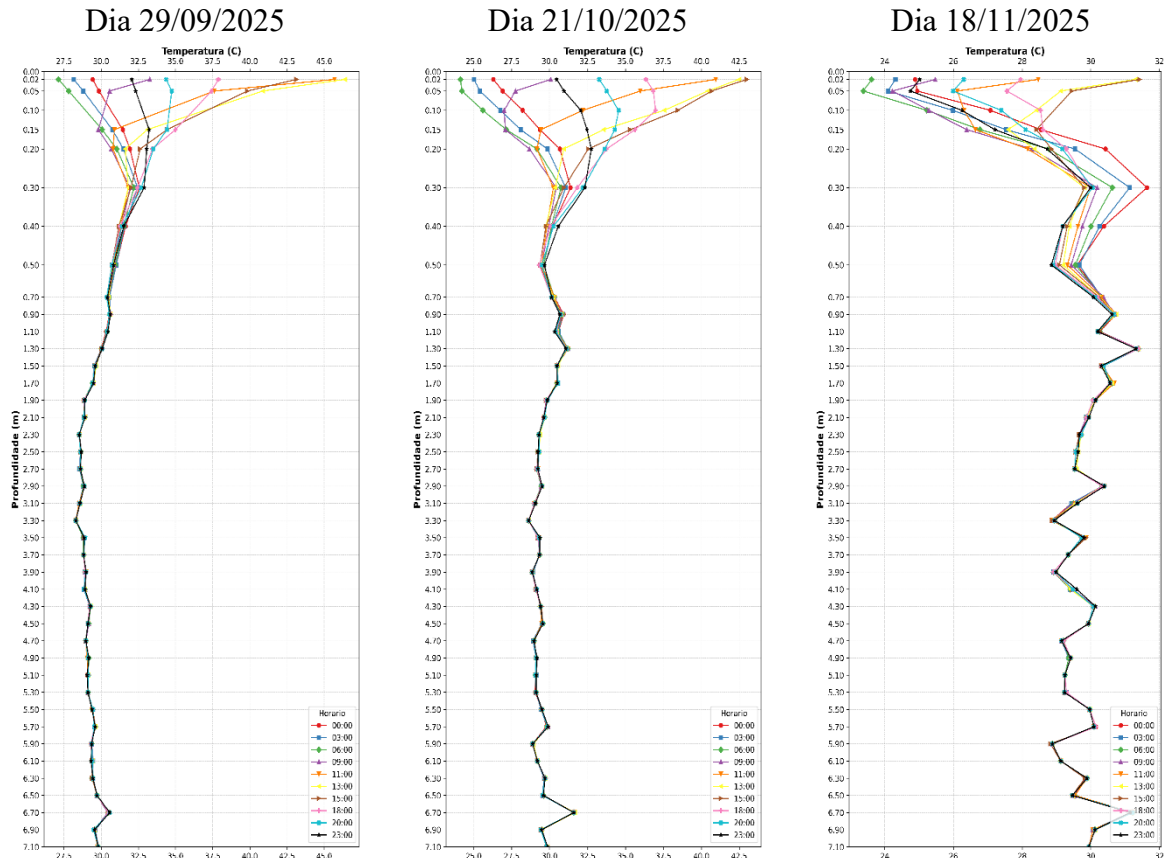
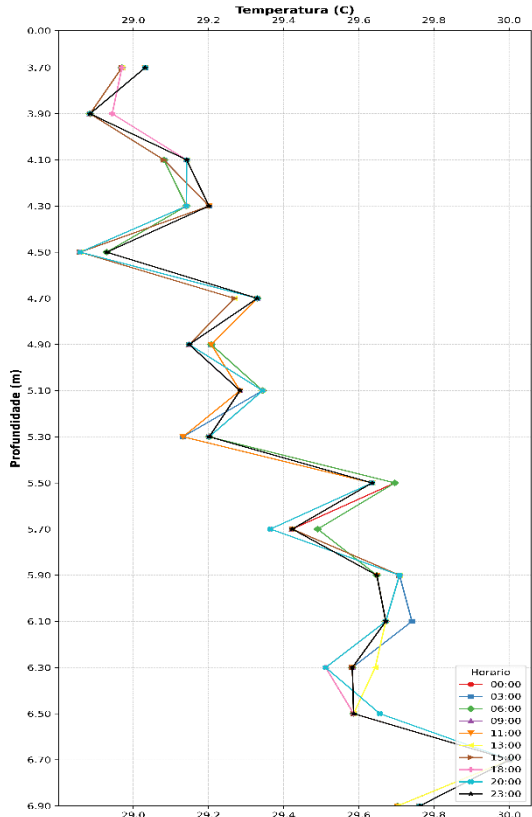


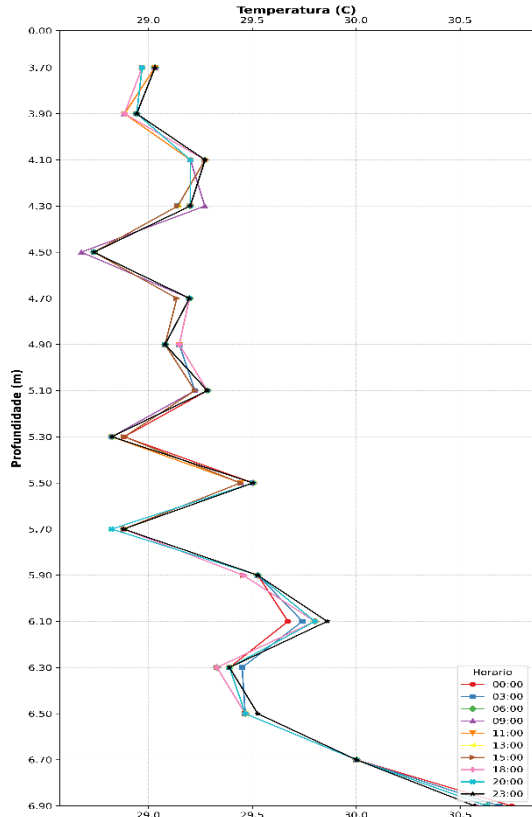
Figura 19. Perfis Taltocrônicos de 0 a 7,10 m. (Set-Nov 2025).

Além dos perfis apresentados, a Figura 20 ilustra os gráficos taltocrônicos referentes aos sensores 42 a 58, abrangendo o intervalo de 3,70 a 6,90 m de profundidade. Essa disposição física dos sensores encontra-se invertida em relação ao eixo vertical original, com o Sensor 58 posicionado a 3,70 m e o Sensor 42 a 6,90 m, correspondendo à região dobrada da sonda durante a instalação em campo. Observa-se que nessa faixa, o solo apresenta baixa amplitude térmica diária indicando a atenuação das oscilações superficiais e um regime térmico estável, condicionado pela condutividade e pela capacidade calorífica das camadas mais profundas.

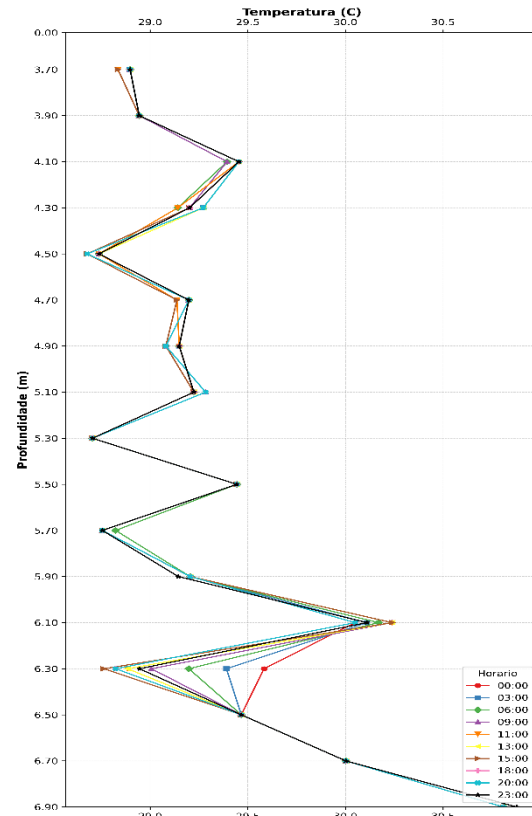
(a) Dia 15/09/2025



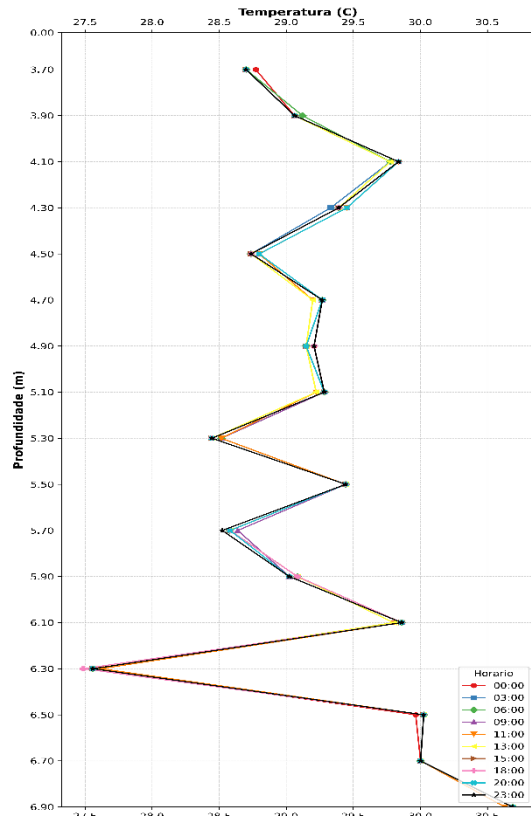
(b) Dia 29/09/2025



(c) Dia 07/10/2025



(d) Dia 21/10/2025



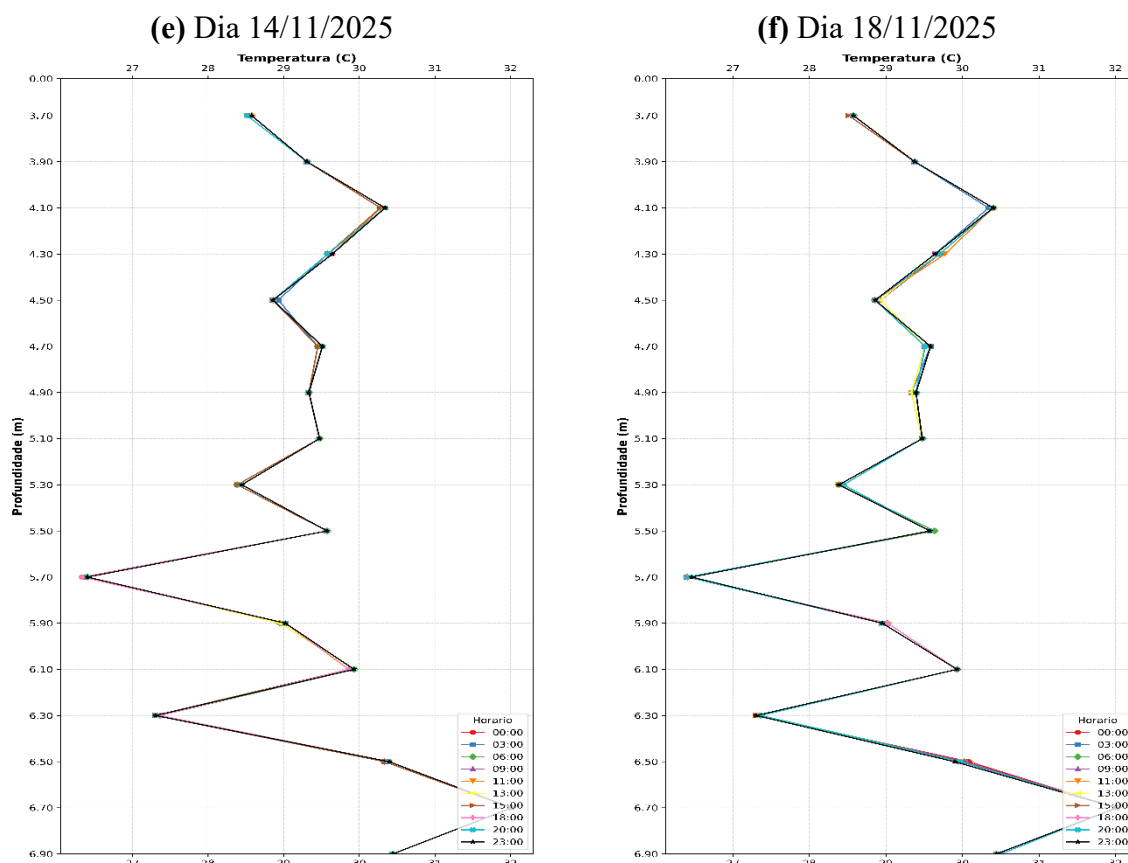


Figura 20. Conjunto de gráficos Taltocrônicos de 3,70 a 6,90 m. (a) e (b) setembro, (c) e (d) outubro, (e) e (f) novembro.

Os perfis taltocrônicos demonstram a eficiência da sonda multiponto desenvolvida em capturar as variações térmicas com boa resolução vertical e temporal, permitindo uma análise dos gradientes de temperatura, do amortecimento da amplitude e do atraso térmico em diferentes profundidades. Tais resultados reforçam a aplicabilidade do sistema para estudos de fluxo de calor no solo e modelagem do balanço de energia em ecossistemas.

4.7 Perfil temporal da temperatura do solo instalado na área experimental

A Figura 21 apresenta o comportamento temporal da temperatura do solo registrado pela sonda multiponto após sua instalação em campo. O padrão térmico observado evidencia a distribuição vertical da onda térmica no solo típica de ambientes tropicais sazonais, caracterizada por elevada amplitude nas camadas superficiais e progressivo amortecimento em profundidade. Nos primeiros 30 cm, a resposta térmica é dominada pelas variações diurnas resultantes da interação solo-atmosfera, refletindo diretamente o balanço de energia na superfície, com aquecimento durante o período de maior incidência de radiação e resfriamento noturno (Campbell; Norman, 2000; Hillel, 2003). A partir de aproximadamente 50 cm, as oscilações tornam-se mais suaves e apresentam atraso de fase mais pronunciado, evidenciando

a dissipação da onda térmica e o aumento da capacidade térmica volumétrica com a profundidade.

Nas camadas profundas (> 1 m), o registro indica um regime térmico de baixa frequência e reduzida amplitude, coerente com a literatura que descreve a predominância de processos sazonais no controle da variação térmica em subsuperfície, uma vez que a influência atmosférica é progressivamente atenuada com a profundidade (Baker; Baker, 2002; Beltrami *et al.*, 2017). A estabilidade das séries temporais nessas camadas reforça a expectativa teórica de que a propagação da onda térmica ocorre de forma difusiva, controlada pela condutividade e pela difusividade térmica do solo, com comportamento aproximado de uma solução harmônica amortecida.

O conjunto de dados evidência, ainda, que a sonda de temperatura multiponto foi capaz de registrar adequadamente tanto as oscilações diurnas de resposta rápida nas camadas superficiais quanto as variações mais lentas associadas à dinâmica sazonal das camadas profundas, demonstrando o correto funcionamento do sistema em campo e sua capacidade de capturar a estrutura vertical da onda térmica. Esse comportamento é consistente com observações experimentais em ambientes tropicais e subtropicais, que mostram forte controle da radiação, da umidade e da estrutura do solo sobre a amplitude e a propagação do calor (Curado *et al.*, 2013; Lozano-Parra *et al.*, 2018; Zimmer *et al.*, 2023).

Em síntese, o perfil temporal obtido confirma a adequação da sonda multiponto para medições contínuas de alta resolução, possibilitando a caracterização detalhada do amortecimento térmico, do atraso de fase e da evolução vertical da temperatura no solo, elementos fundamentais para estudos de fluxo de calor, balanço de energia e dinâmica hidrotérmica em ecossistemas tropicais.

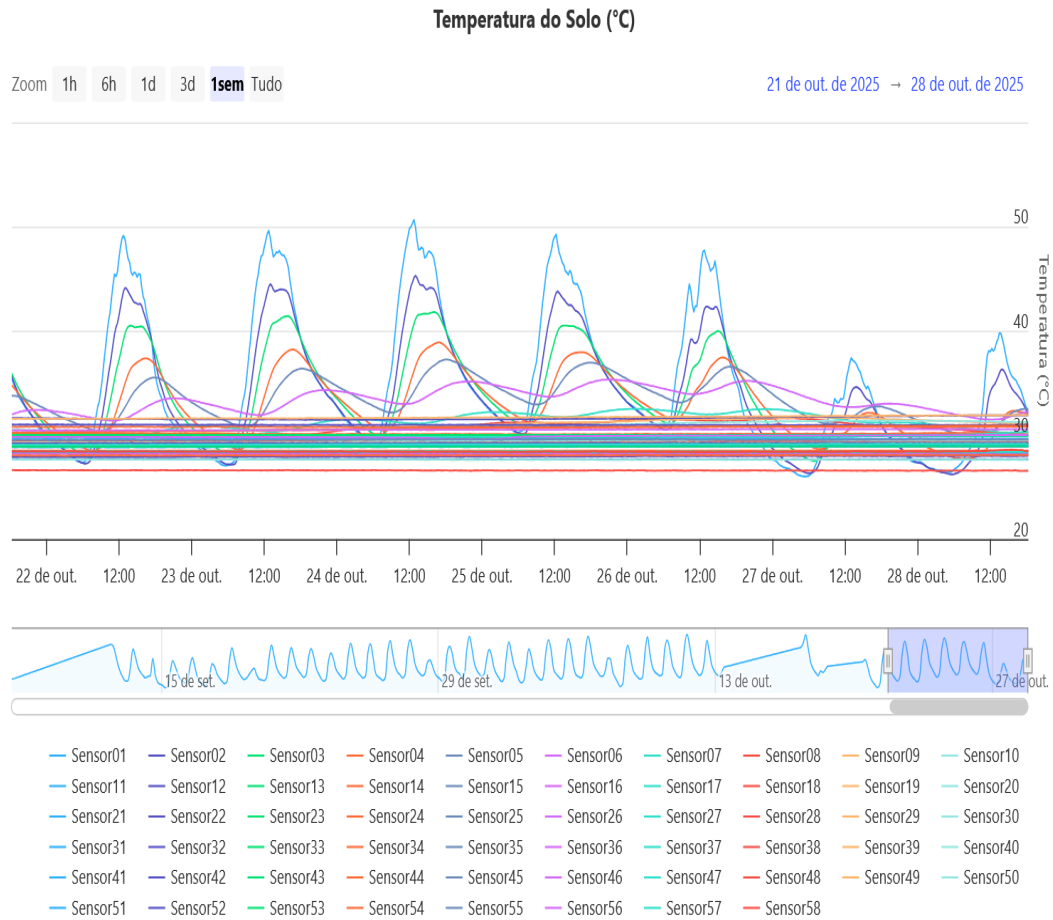


Figura 21. Serie temporal da temperatura do solo instalado na área experimental

4.8 Discussão Geral

Os resultados obtidos evidenciam que a sonda de temperatura multiponto apresentou desempenho satisfatório ao longo de todo o período de monitoramento, permitindo a caracterização térmica do solo em múltiplas profundidades com boa resolução temporal e espacial. A combinação de altos valores de coeficiente de determinação R^2 , baixa dispersão e redução significativa do MAE, confirmam a eficiência dos procedimentos de calibração e validação aplicados. Esses resultados reforçam a confiabilidade metrológica do sistema e a adequação dos sensores digitais DS18B20 para aplicações científicas em instrumentação ambiental.

A análise dos perfis tautócrônos complementa esses resultados ao demonstrar a capacidade da sonda em registrar a propagação vertical da onda térmica e os efeitos de atenuação da amplitude e atraso de fase com a profundidade. Os registros obtidos entre setembro e novembro de 2025 demonstram coerência com o comportamento teórico da condução de calor em meios porosos, conforme descrito por (Campbell; Norman, 2000) e

(Hillel, 2003). Nas camadas superficiais (até 0,10 m), observou-se a influência da radiação solar e da variação diurna da temperatura do ar, resultando em amplitudes térmicas elevadas. Abaixo de 0,50 m, a temperatura passou a apresentar comportamento quase constante ao longo das 24 h, refletindo o controle do fluxo de calor por condução e o efeito da inércia térmica do solo.

A ampliação da análise para todo o perfil de 0 a 7,10 m mostrou que, abaixo de aproximadamente 1,0 m as variações diurnas desaparecem quase completamente, caracterizando um regime térmico estável e com tendência de aquecimento gradual ao longo da transição seca-úmida. Esse padrão é consistente com o avanço da frente térmica sazonal, fenômeno descrito por (Bristow; Campbell; Calissendorff, 1984), e reforça o papel do solo como reservatório de energia durante os períodos de aquecimento superficial.

Esses resultados estão em consonância com estudos recentes que destacam a eficiência e a viabilidade dos sensores DS18B20 para monitoramento térmico ambiental (Elyounsi; Kalashnikov, 2021; Manurung *et al.*, 2023), bem como com observações experimentais conduzidas em contextos tropicais por (Teleszewski *et al.*, 2022). A concordância entre a resposta térmica observada e os modelos teóricos de condução do calor confirma que a sonda desenvolvida é uma ferramenta para a análise do perfil térmico do solo, especialmente em estudos micrometeorológicos e de balanço de energia.

Com base nos resultados, conclui-se que a sonda de temperatura multiponto após calibrada apresenta confiabilidade e precisão adequada para aplicações em pesquisas ambientais, micrometeorológicas e agrometeorológicas, permitindo a obtenção contínua de dados detalhados sobre a dinâmica térmica do solo. Sua aplicação possibilita o uso em modelos de fluxo de calor no solo e no entendimento dos processos de armazenamento e dissipação de energia em ecossistemas e contribuindo para análises de balanço de energia em ambientes de transição como o Cerrado-Pantanal.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento e calibração de uma sonda de temperatura multiponto de baixo custo para o monitoramento contínuo da temperatura do solo em profundidades conhecidas. A proposta visou suprir uma lacuna na instrumentação ambiental, por meio da criação de um sistema capaz de ampliar a resolução espacial e temporal das medições térmicas em estudos ambientais e micrometeorológicos.

5.1 Contribuições do Estudo

O presente trabalho oferece contribuições para a área de instrumentação ambiental e micrometeorológica:

- Desenvolvimento tecnológico: Projeto, construção e calibração de uma sonda de temperatura multiponto, desenvolvida integralmente em laboratório com componentes de baixo custo e de ampla disponibilidade comercial.
- Base para Estudos de Temperatura: Construção de uma base instrumental podendo ser aplicada ao estudo da dinâmica térmica do solo em ecossistemas, com potencial de integração em modelos de balanço de energia e agrometeorologia.
- Integração modular: O sistema foi projetado para operar de forma autônoma ou podendo ser integrada a plataformas de aquisição, viabilizando futuras aplicações em torres micrometeorológicas, estações experimentais e redes de monitoramento ambiental.
- A utilização de hardware e software abertos facilita a replicabilidade da sonda em diferentes regiões e instituições, contribuindo para o avanço científico e tecnológico em estudos ambientais.

5.2 Limitações e Incertezas

Apesar do desempenho satisfatório, e por se tratar de um estudo voltado ao desenvolvimento instrumental, algumas limitações e incertezas são reconhecidas:

- Variabilidade individual dos Sensores: Os sensores DS18B20 apresentam pequenas variações de resposta térmica, exigindo calibração individual antes da montagem definitiva. Após a instalação em profundidade, não é possível realizar nova calibração física; assim, limitações residuais podem persistir, sendo possível apenas o acompanhamento de consistência das leituras ao longo do tempo.
- Influência do Solo: Propriedades do solo como umidade, a densidade e a textura, influenciam no acoplamento térmico entre o sensor e o meio e afetam diretamente a propagação da onda de calor, o que deve ser considerado em aplicações futuras.
- Escopo limitado ao desenvolvimento: O presente estudo concentrou-se no desenvolvimento, construção e calibração em ambiente controlado da sonda multiponto, não incluindo aspectos como desempenho em longo prazo, estabilidade operacional em condições ambientais reais e resposta a ciclos sazonais não foram avaliados.

5.3 Recomendações e Trabalhos Futuros

Para expandir a aplicação da sonda multiponto, é recomendado os seguintes trabalhos futuros:

- Validação em Campo: Realizar o monitoramento ao longo de períodos sazonais e interanuais, incluindo resposta do sistema a eventos extremos característicos da região (inundações, secas severas).
- Expansão de funcionalidades: Incorporação de sensores de umidade do solo, fluxo de calor superficial (placas HFP), pressão atmosférica e radiação, permitindo análises integradas de balanço de energia.
- Otimização Operacional: Desenvolver soluções de telemetria (*LoRa*, *4G* ou *Wi-Fi* rural), monitoramento remoto, gestão energética fotovoltaica e rotinas automáticas de diagnóstico para detecção de falhas.

5.4 Considerações Finais

O desenvolvimento da sonda de temperatura multiponto, demonstrou desempenho consistente e com custo-benefício, sendo apropriada para monitoramento térmico contínuo em múltiplas profundidades com boa resolução vertical. O processo de desenvolvimento e calibração realizado mostra a viabilidade técnica da solução proposta, abrindo caminho para aplicações futuras em pesquisas ambientais, agrícolas e micrometeorológicas.

A solução proposta amplia a densidade espacial de medições, reduz custos e viabiliza o acesso a dados térmicos de alta resolução. O uso de sensores digitais DS18B20, combinado à calibração individual, mostra-se eficaz para aplicações ambientais, e a arquitetura aberta favorece replicabilidade e futuras expansões. Desse modo, a sonda de temperatura multiponto representa um avanço instrumental para estudos de fluxo de calor no solo, modelagem microclimática, agrometeorologia e pesquisas sobre o equilíbrio térmico em diversos biomas.

Assim, o desenvolvimento da sonda de temperatura multiponto combina instrumentação de baixo custo aplicada na análise ambiental, e busca ampliar o acesso a medições para o monitoramento térmico e para o entendimento dos processos de armazenamento e propagação de calor no solo. Buscando fortalecer as bases para estudos futuros sobre a dinâmica térmica dos solos e suas implicações no equilíbrio climático.

6 REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, Kabindra; HARTEMINK, Alfred E. Linking soils to ecosystem services—A global review. **Geoderma**, [s. l.], v. 262, p. 101–111, 2016.
- BAKER, John M; BAKER, Donald G. Long-term ground heat flux and heat storage at a mid-latitude site. **Climatic Change**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 295–303, 2002.
- BELTRAMI, Hugo *et al.* Impacts of the Last Glacial Cycle on ground surface temperature reconstructions over the last millennium. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 355–364, 2017.
- BENSE, VF; KOOI, H. Temporal and spatial variations of shallow subsurface temperature as a record of lateral variations in groundwater flow. **Journal of geophysical research: Solid Earth**, [s. l.], v. 109, n. B4, 2004.
- BRISTOW, KL; CAMPBELL, GS; CALISSENDORFF, C. The effects of texture on the resistance to water movement within the rhizosphere. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 266–270, 1984.
- CAMPBELL, Gaylon S; NORMAN, John M. **An introduction to environmental biophysics**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2000.
- COSTA, Rayanna de Oliveira. Dinâmica do fluxo de calor e temperatura do solo no Pantanal mato-grossense. [s. l.], 2023.
- CURADO, Leone Francisco Amorim *et al.* Analysis of thermal conductivity in a seasonal flooded forest in the northern Pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 28, p. 125–128, 2013.
- DE MORAIS DANELICHEN, Victor Hugo; BIUDES, Marcelo Sacardi. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. **Ciência e Natura**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 227–240, 2011.
- DINIZ, Julio Mannuel Tavares; ALBUQUERQUE, Erickson Melo; RAFAEL, Renata Araujo. Estudo acerca da variabilidade térmica do solo. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2014.
- ELYOUNSI, Ali; KALASHNIKOV, Alexander N. Evaluating suitability of a DS18B20 temperature sensor for use in an accurate air temperature distribution measurement network. **Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 56, 2021.
- FAO, FAOSTAT; OTHERS. Food and agriculture organization of the United Nations. **Rome**, URL: <http://faostat.fao.org>, [s. l.], v. 403, 2018.
- HILLEL, Daniel. **Introduction to environmental soil physics**. [S. l.]: Elsevier, 2003.
- KOESTOER, RA *et al.* A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. 2019. **AIP Conference Proceedings**. [S. l.]: AIP Publishing LLC, 2019. p. 020006.

LEGATES, David R; MCCABE JR, Gregory J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LEVINTAL, Elad *et al.* An underground, wireless, open-source, low-cost system for monitoring oxygen, temperature, and soil moisture. **SOIL Discussions**, [s. l.], v. 2021, p. 1–22, 2021.

LLORET, Jaime *et al.* A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 21, p. 7243, 2021.

LOZANO-PARRA, Javier *et al.* How do soil moisture and vegetation covers influence soil temperature in drylands of Mediterranean regions?. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1747, 2018.

LYU, Zhiqiang; ORSI, Anais J; GOOSSE, Hugues. Comparison of observed borehole temperatures in Antarctica with simulations using a forward model driven by climate model outputs covering the past millennium. **Climate of the Past**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 1411–1428, 2020.

MANURUNG, Royston *et al.* Design and Development of A Digital Soil Temperature Monitoring System Based on The Internet of Things at North Sumatra Climatological Station. **Journal of Applied Geospatial Information**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 1065–1074, 2023.

MAXIM INTEGRATED. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. 2015. Disponível em: (<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>). Acesso em: 9 jun. 2025. **Datasheet**, [s. l.], p. 20, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C; PECK, Elizabeth A; VINING, G Geoffrey. **Introduction to linear regression analysis**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2021.

NOVAIS, Jonathan Willian Zangeski *et al.* Geothermal dynamics in Vochysia divergens forest in a Brazilian Wetland. **Air, Soil and Water Research**, [s. l.], v. 6, p. ASWR-S11364, 2013.

PLACIDI, Pisana *et al.* Monitoring soil and ambient parameters in the iot precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 15, p. 5110, 2021.

PREGITZER, Kurt S *et al.* Responses of tree fine roots to temperature. **New Phytologist**, [s. l.], v. 147, n. 1, p. 105–115, 2000.

QUIMATIC. **Fita Isolante Líquida – Ficha Técnica e FISPQ. São Paulo: Quimatic Tapmatic, 2024.** [S. l.]: [s. d.], 2024. Disponível em: https://www.quimatic.com.br/conteudo/boletim/ft_Fita_Isolante_liq.pdf. Acesso em: 9 jun. 2025.

RODRIGUES, Thiago. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [s. l.], 2014.

ROMIO, Leugim Corteze *et al.* Influence of different methods to estimate the soil thermal properties from experimental dataset. **Land**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1960, 2022.

SCHUH, Carina; FRAMPTON, Andrew; CHRISTIANSEN, Hanne Hvidtfeldt. Soil moisture redistribution and its effect on inter-annual active layer temperature and thickness variations in a dry loess terrace in Adventdalen, Svalbard. **The Cryosphere**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 635–651, 2017.

TAMAYO-RUÍZ, Luis Eduardo *et al.* Desvendando a Classificação Climática de Köppen: um guia prático e didático com exemplos. **Scientific Electronic Archives**, [s. l.], v. 18, n. 1, 2025.

TELESZEWSKI, Tomasz Janusz *et al.* The study of soil temperature distribution for very low-temperature geothermal energy applications in selected locations of temperate and subtropical climate. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 3345, 2022.

TODD, M *et al.* Quantifying Inter-and Intra-Sensor Variability in Low-Cost Soil Moisture and Soil Temperature Sensors: A Comparative Study. **Smart Agricultural Technology**, [s. l.], p. 101186, 2025.

VAN LOON, WKP; BASTINGS, HMH; MOORS, EJ. Calibration of soil heat flux sensors. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 1–8, 1998.

WANG, Heng *et al.* Humidity-sensitive PMMA fiber Bragg grating sensor probe for soil temperature and moisture measurement based on its intrinsic water affinity. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 21, p. 6946, 2021.

WILLMOTT, Cort J; MATSUURA, Kenji. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate research**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005.

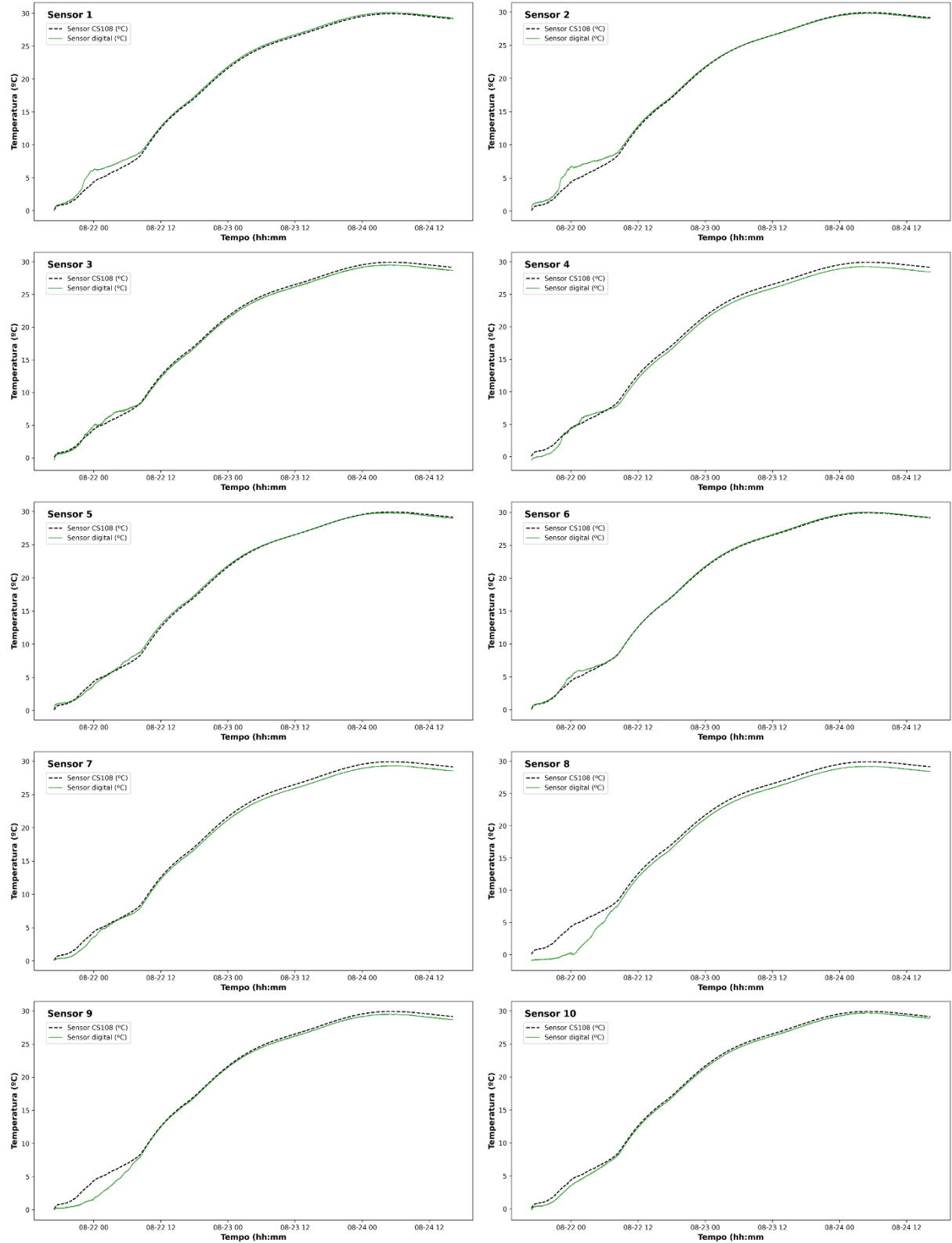
ZASZEWSKI, Daniel; GRUSZCZYŃSKI, Tomasz. A low-cost automatic system for long-term observations of soil temperature. **Geomatics and environmental engineering**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 75–101, 2023.

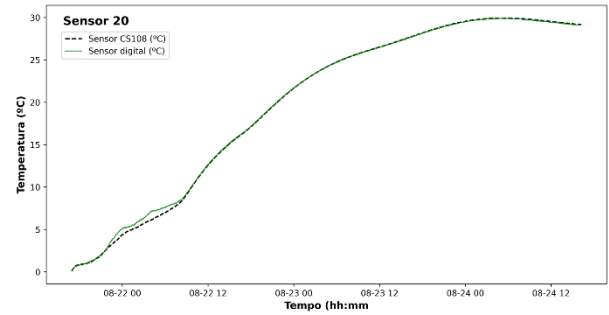
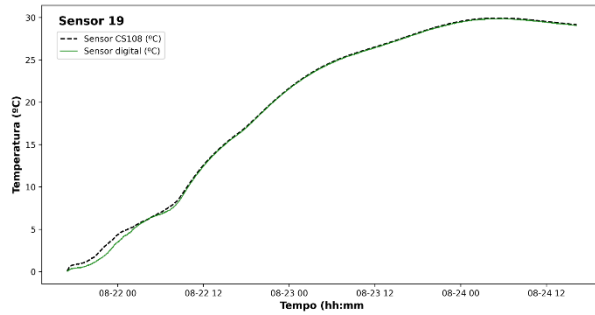
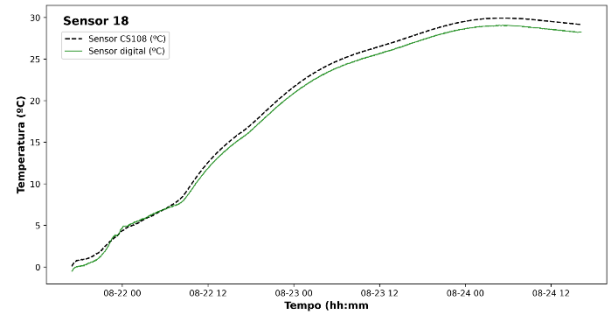
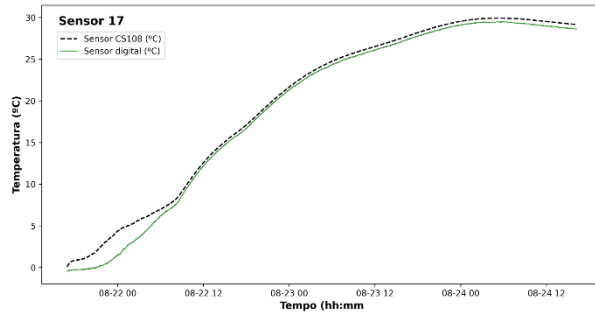
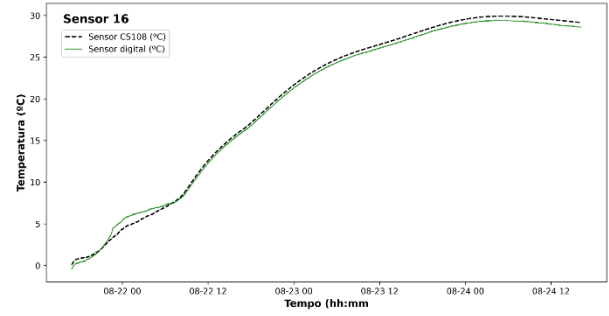
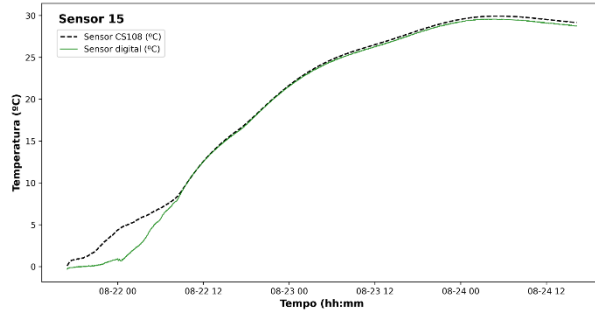
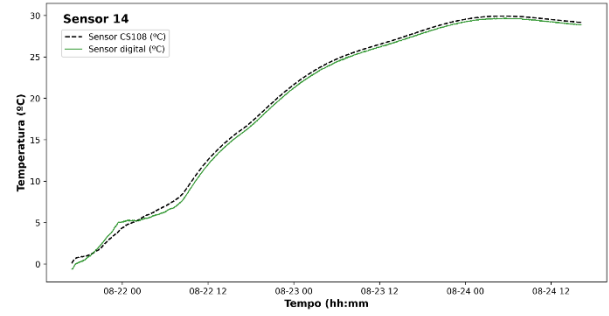
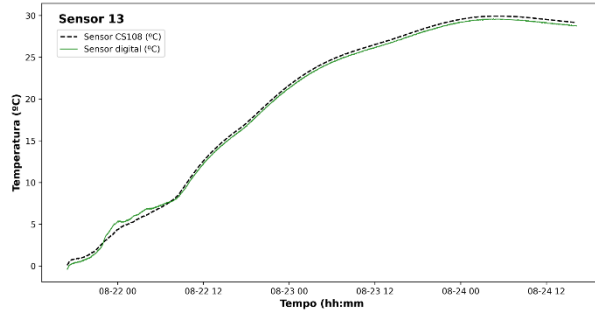
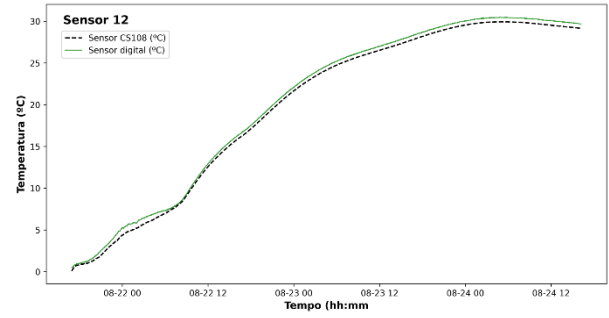
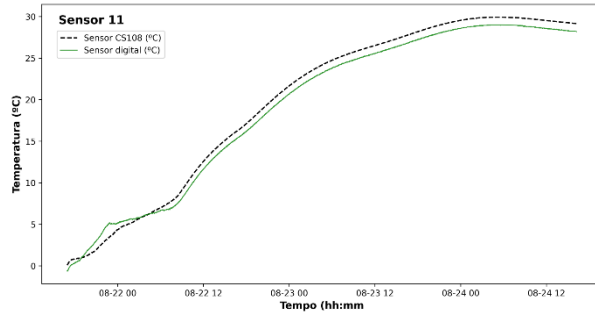
ZHAO, Haidong *et al.* Daily soil temperature modeling improved by integrating observed snow cover and estimated soil moisture in the USA Great Plains. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 4357–4372, 2021.

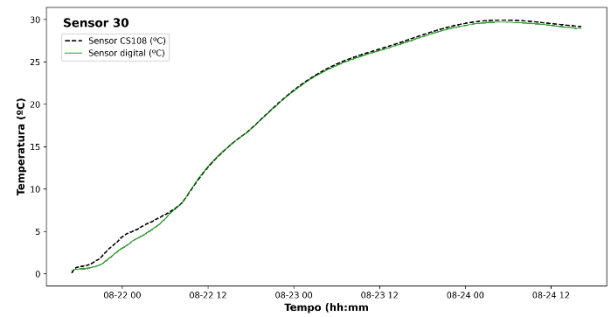
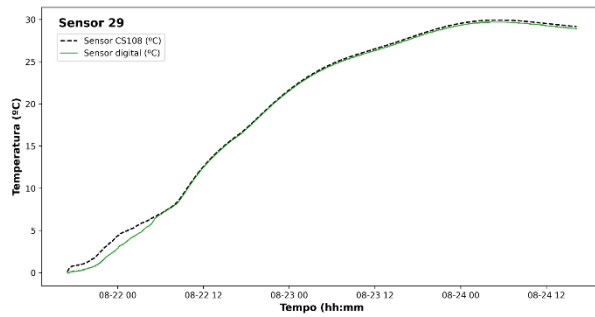
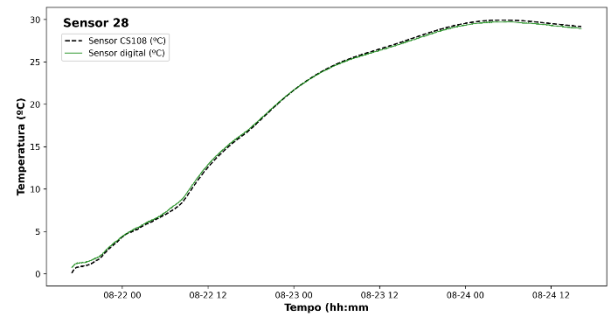
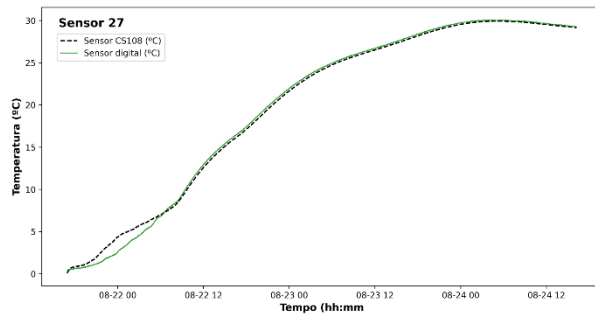
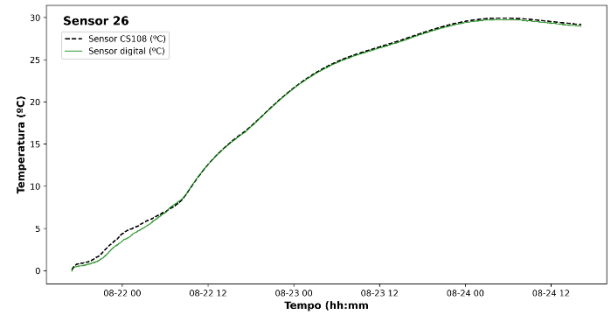
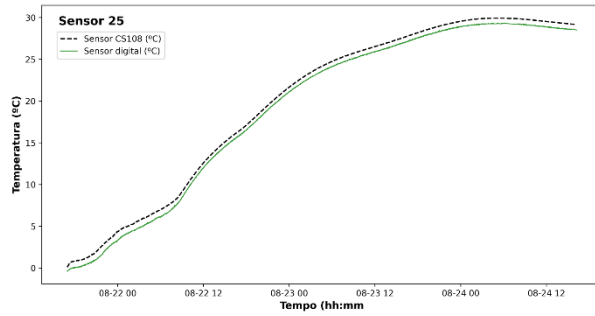
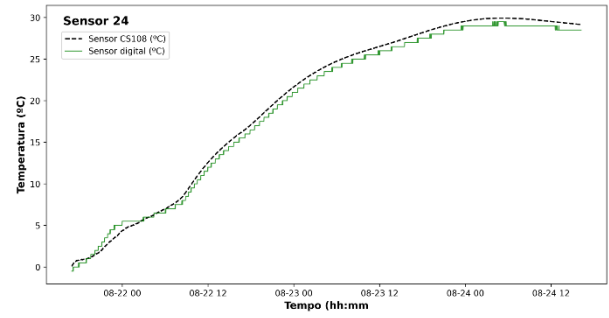
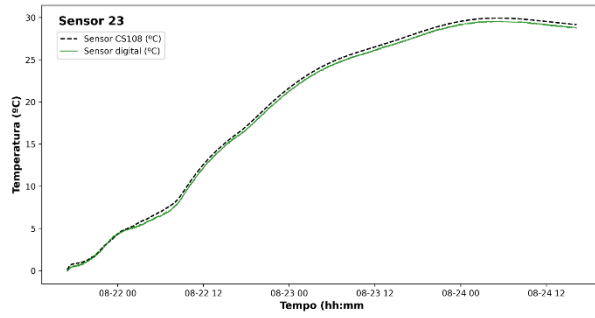
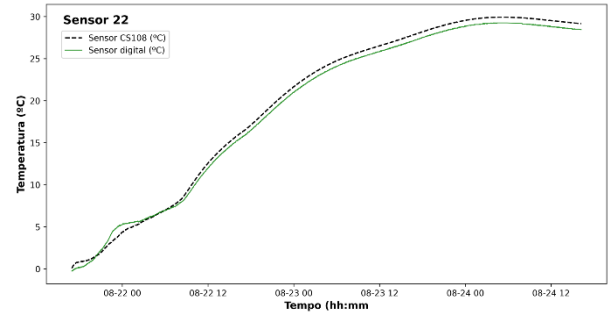
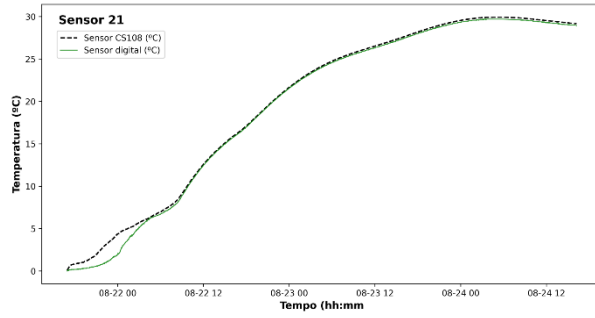
ZIMMER, Tamíres *et al.* Estimation of soil thermal properties using conduction and conduction–convection heat transfer equations in the Brazilian Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 338, p. 109517, 2023.

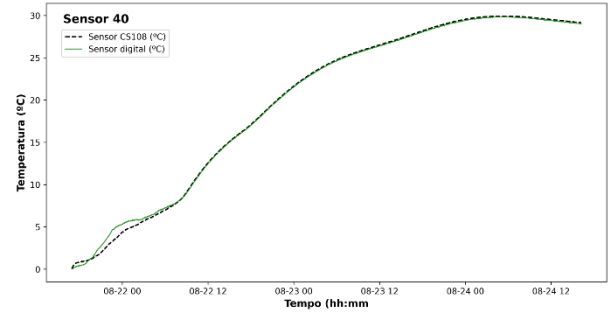
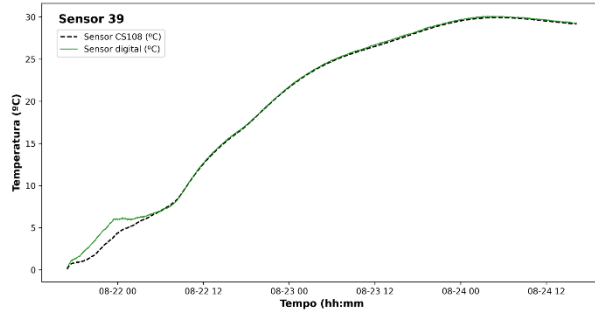
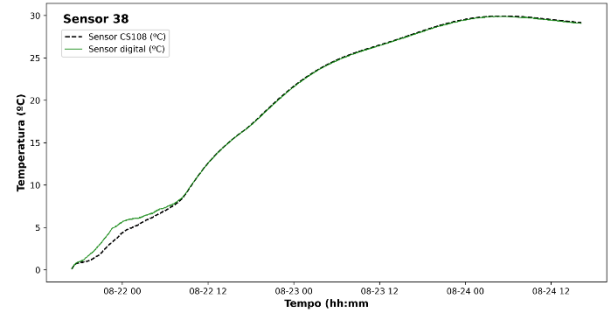
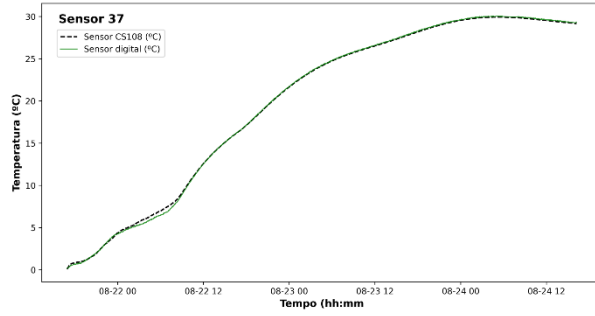
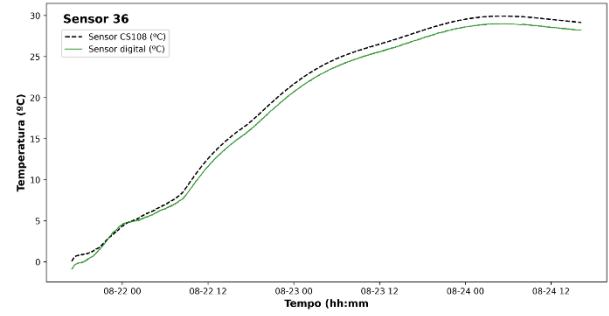
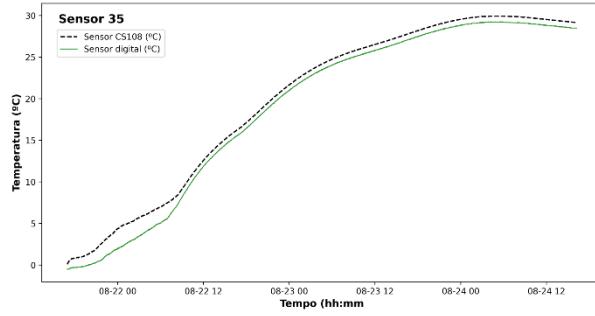
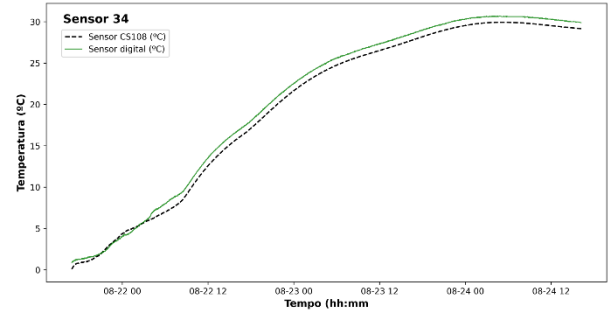
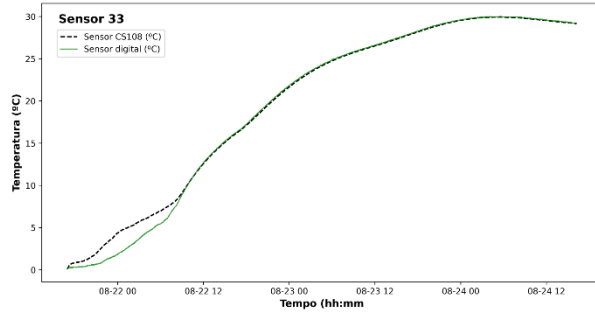
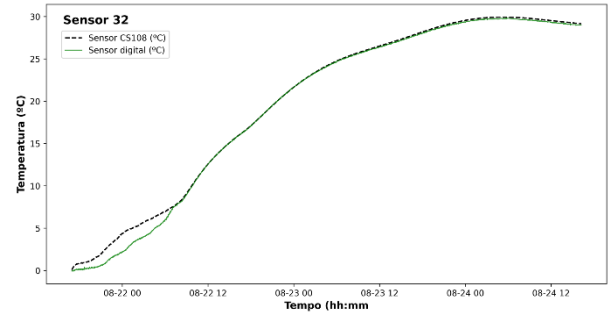
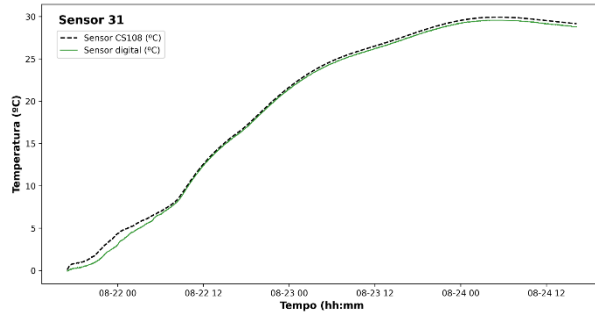
APÊNDICE A – Gráficos

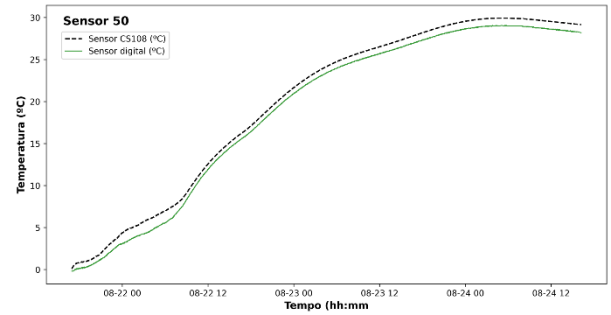
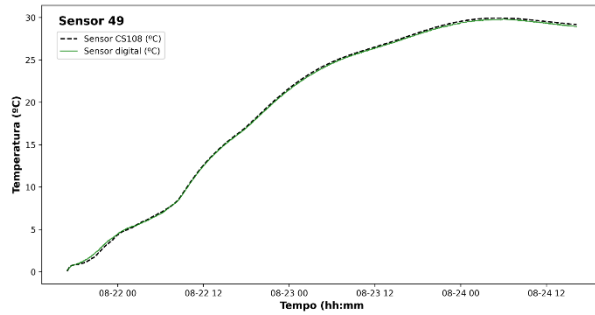
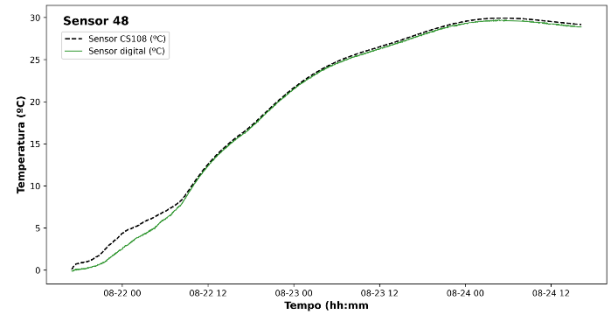
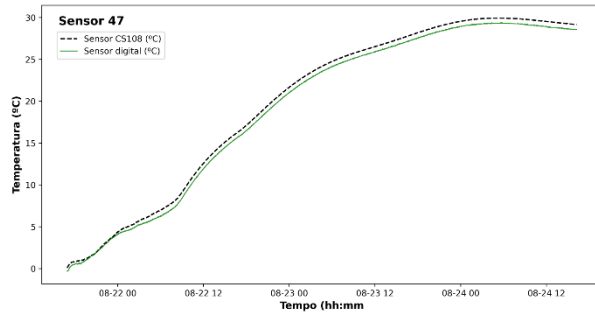
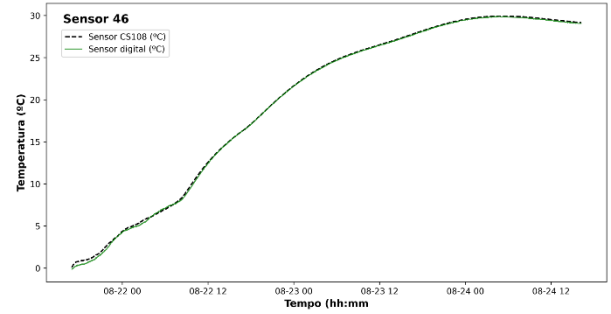
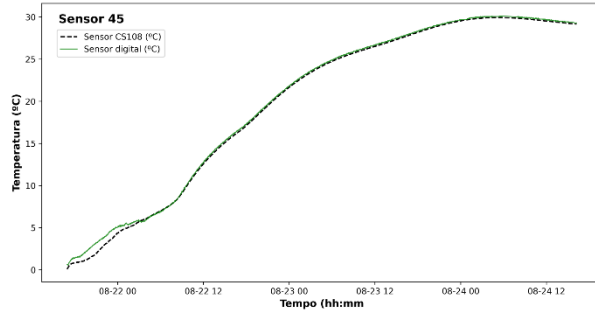
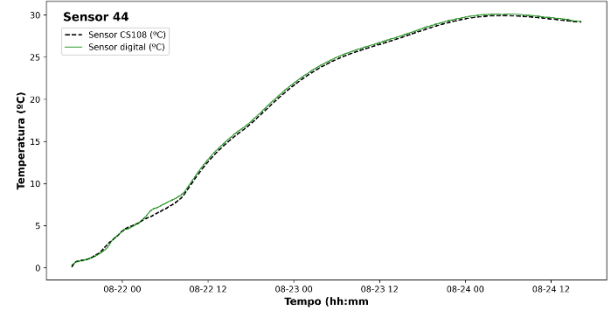
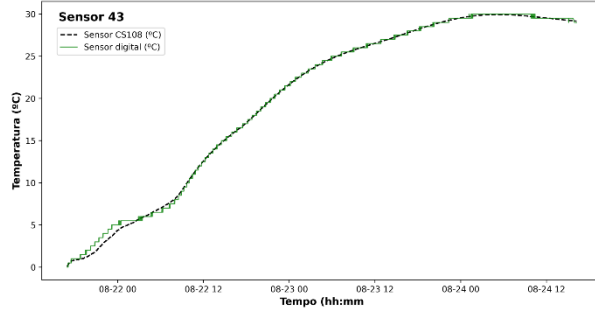
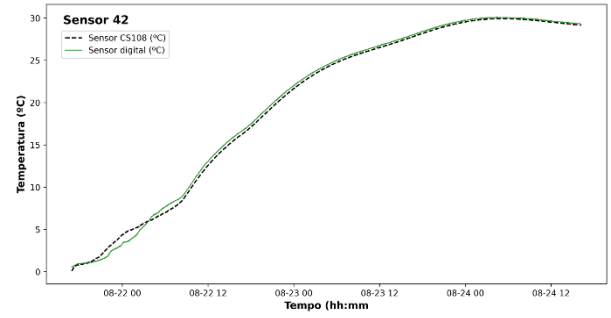
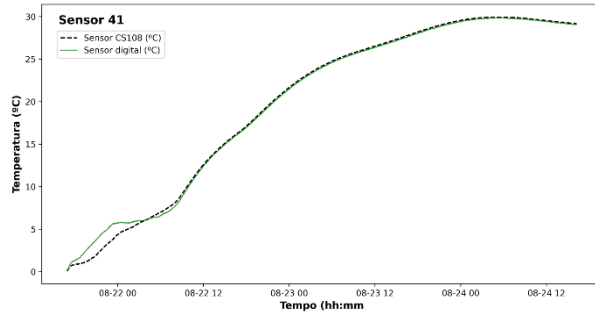
Gráficos dados medidos

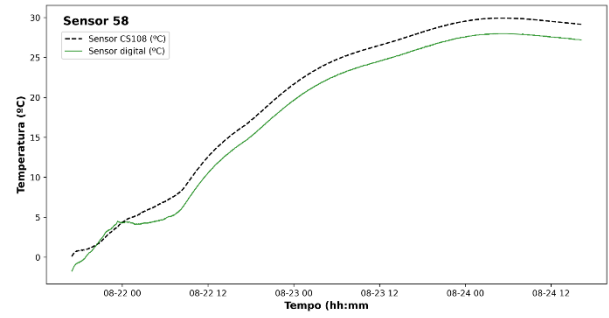
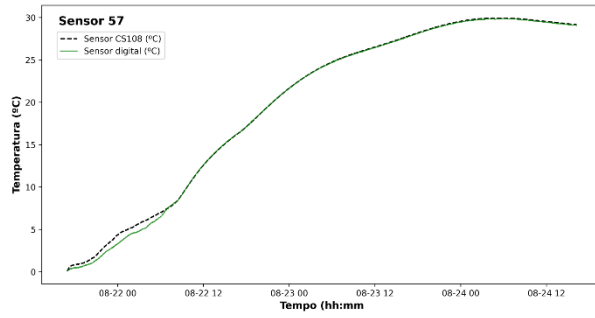
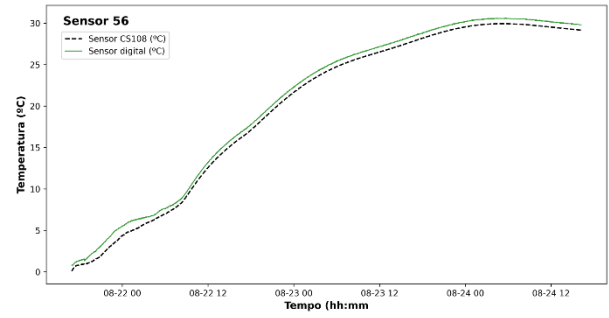
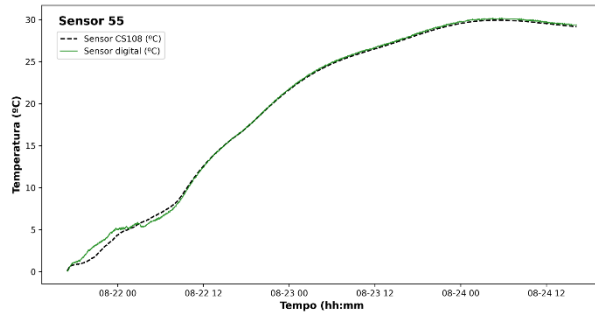
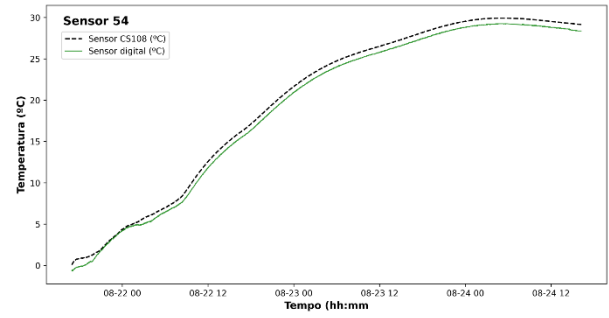
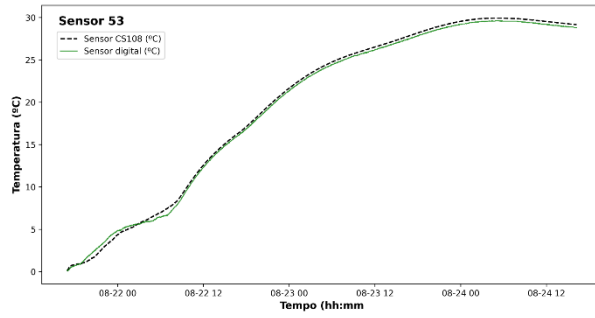
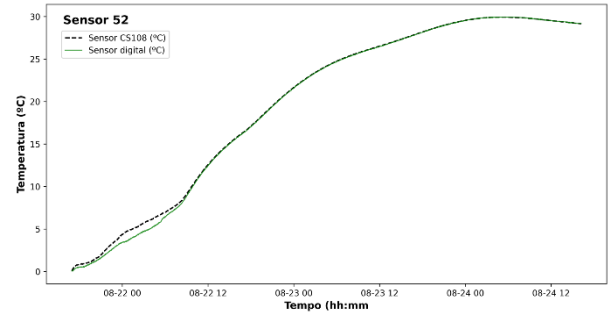
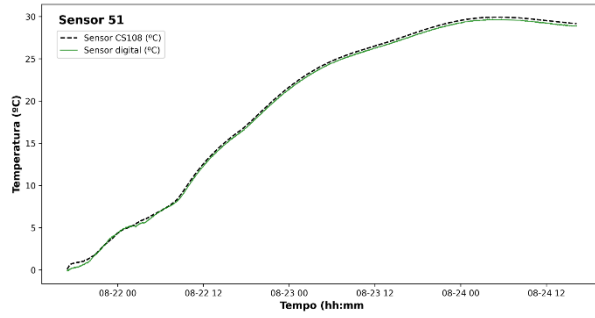




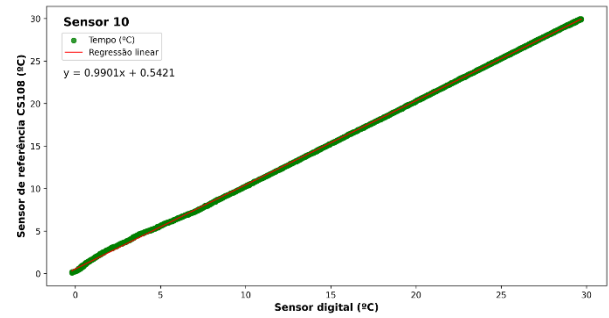
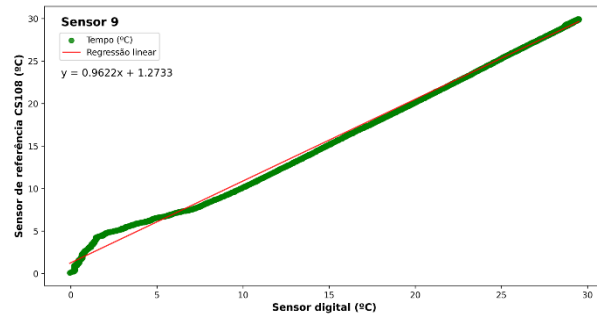
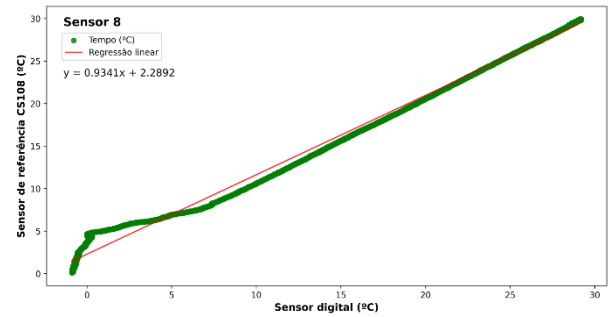
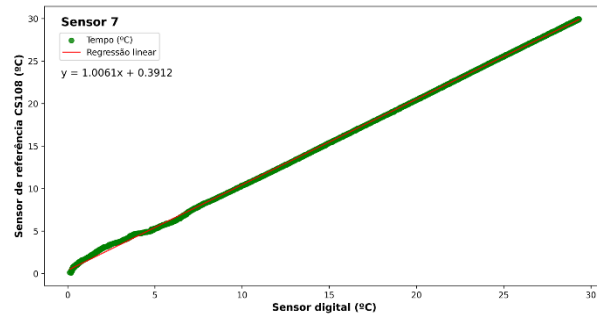
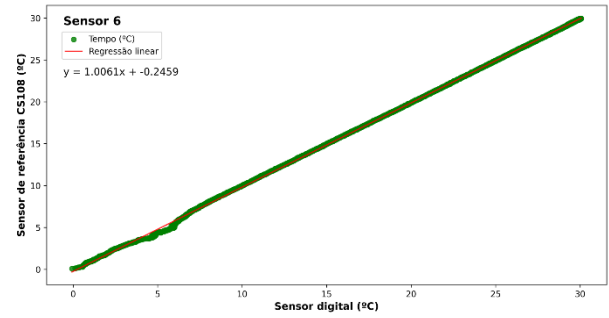
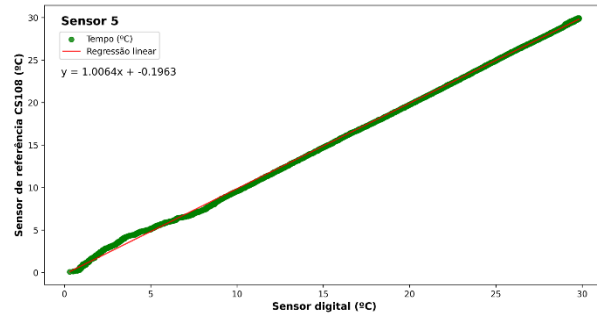
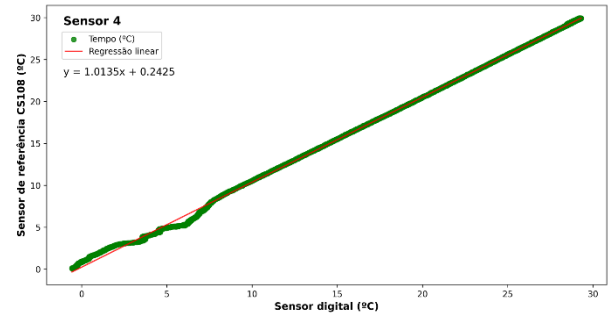
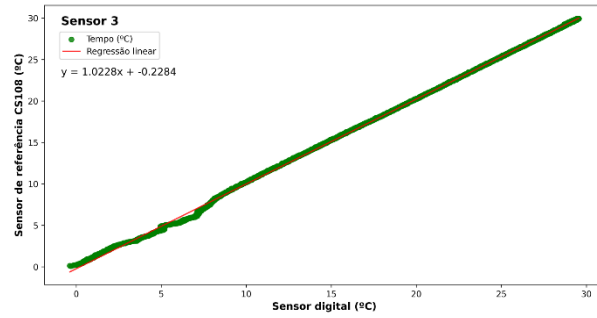
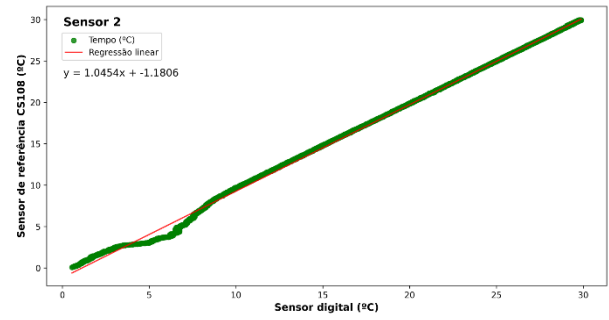
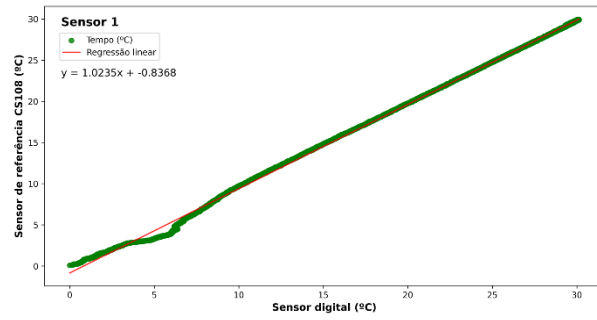


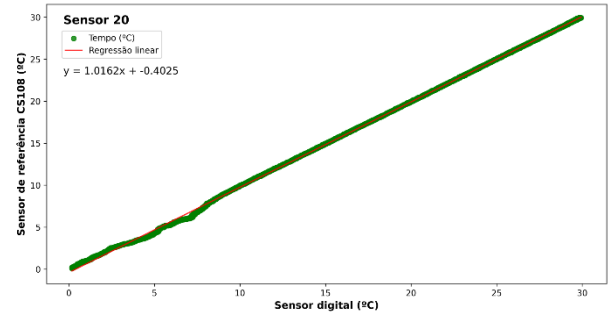
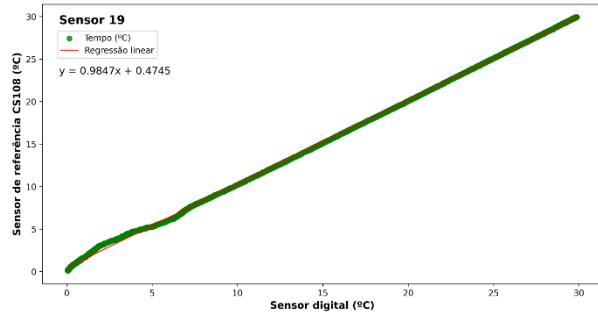
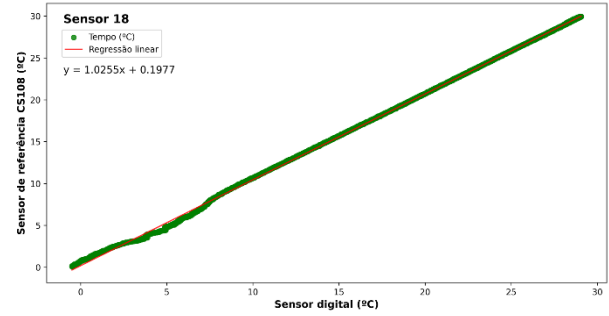
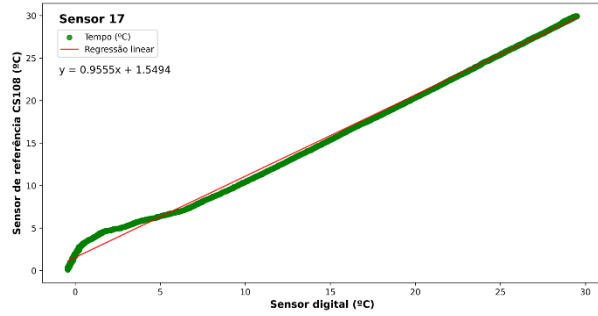
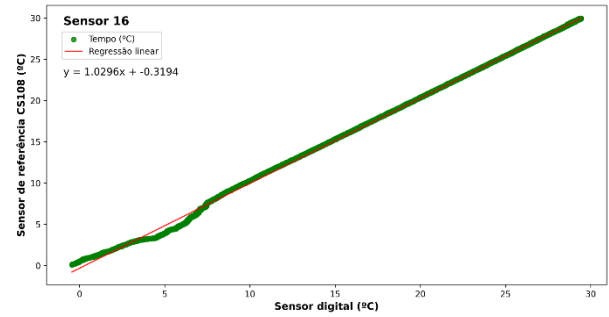
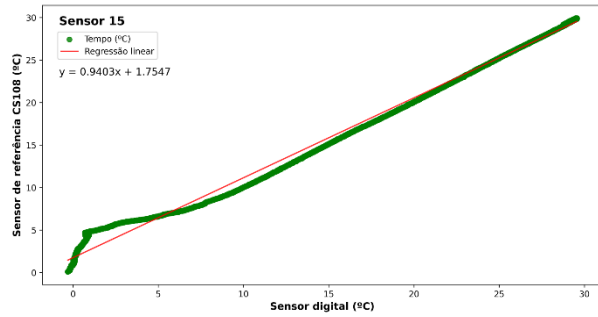
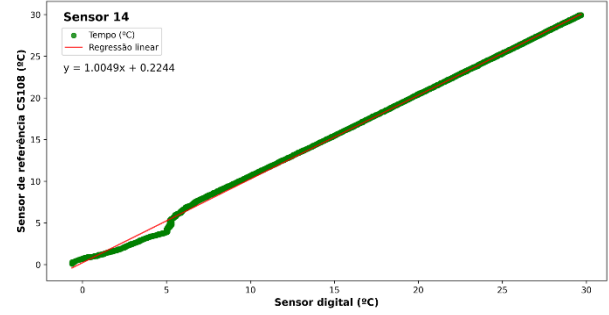
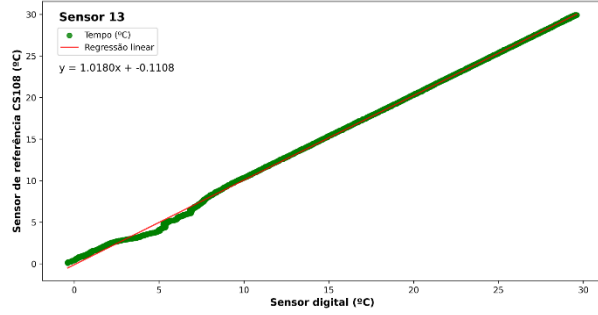
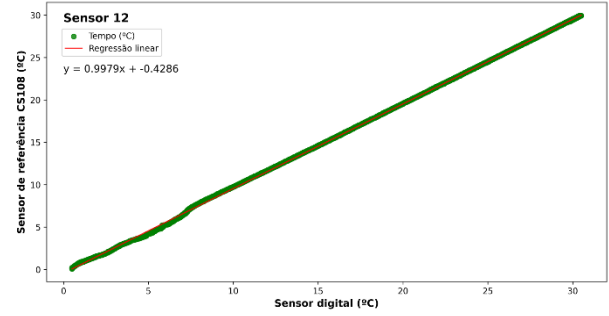
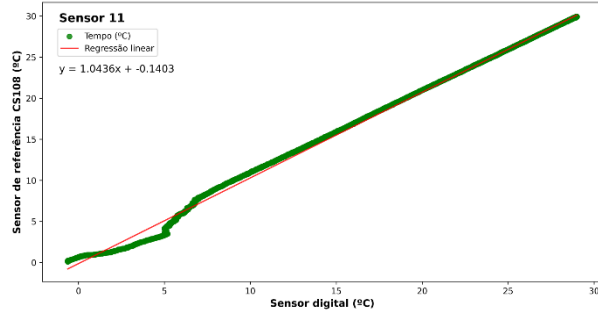


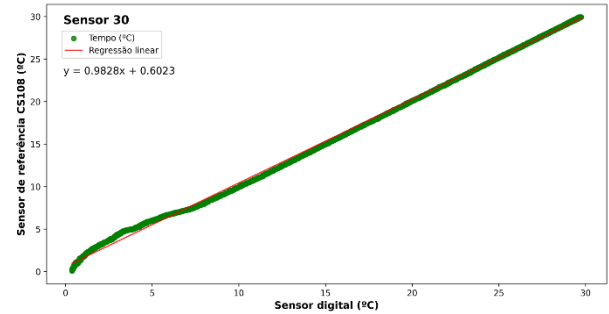
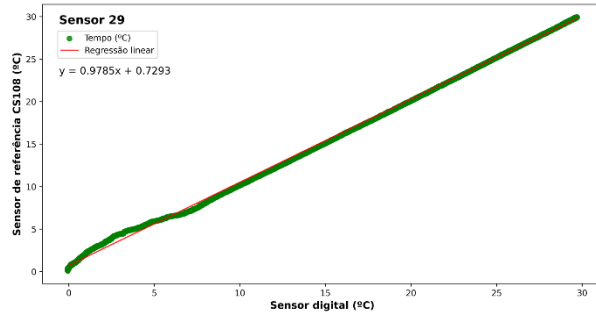
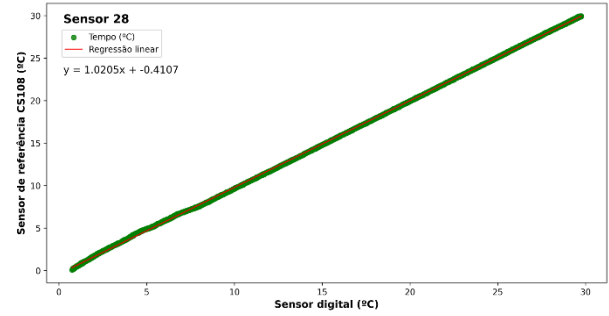
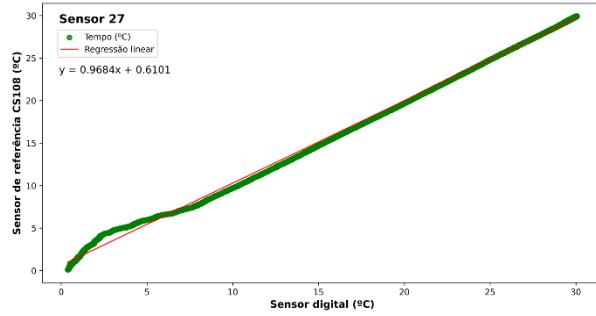
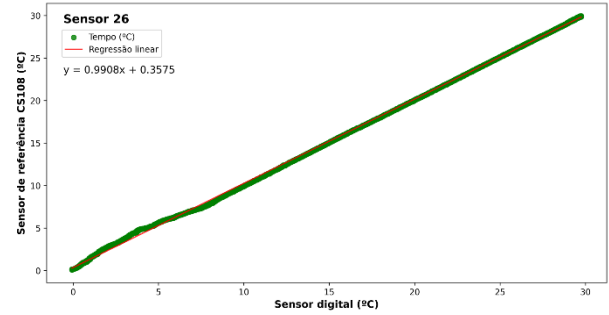
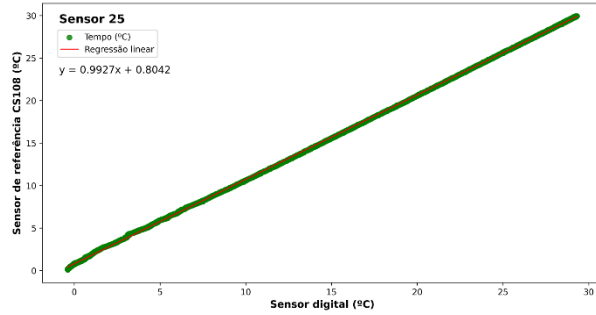
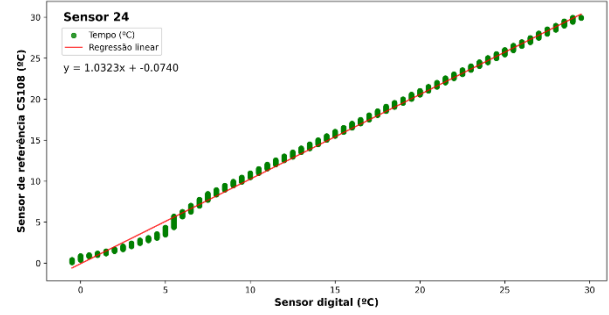
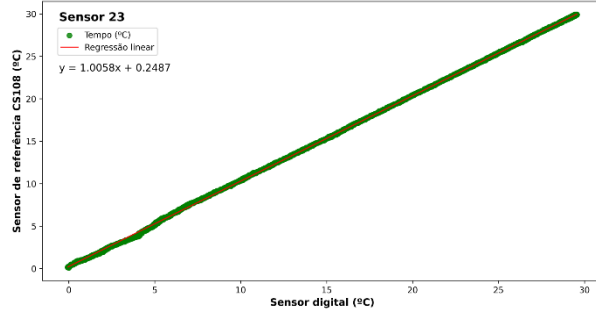
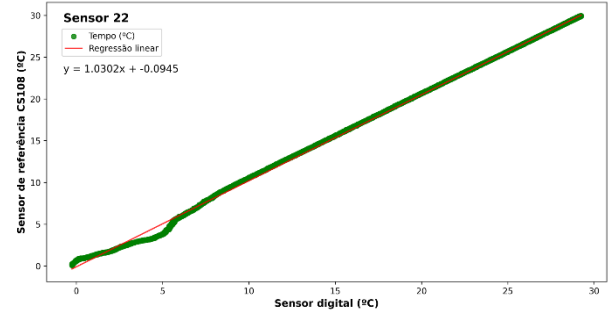
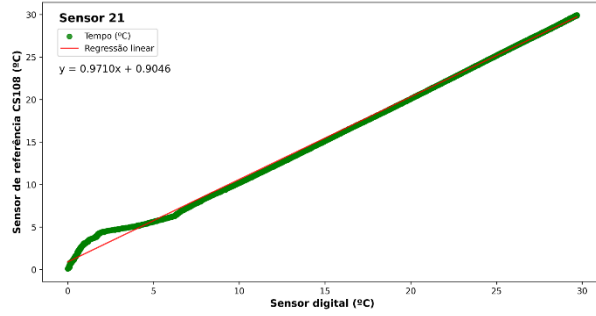


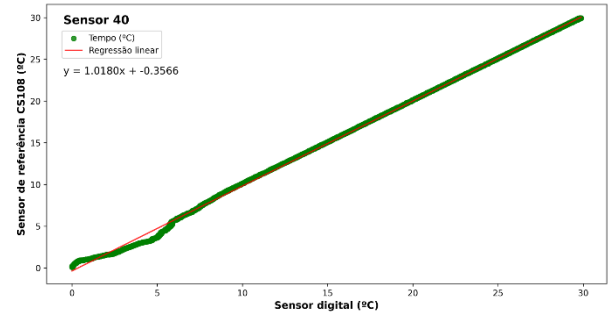
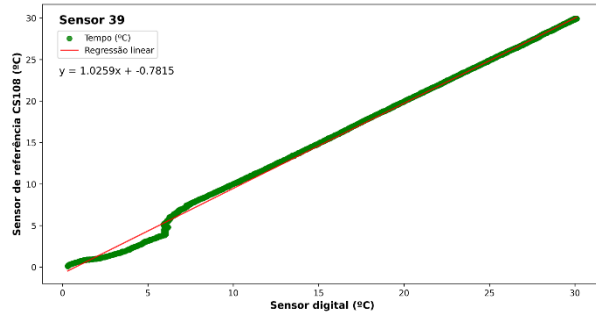
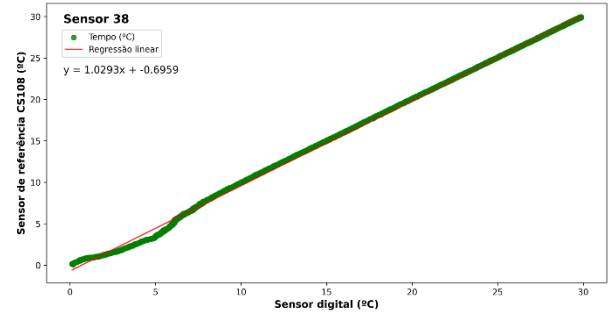
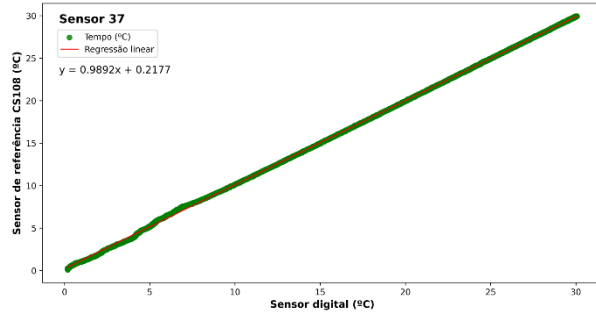
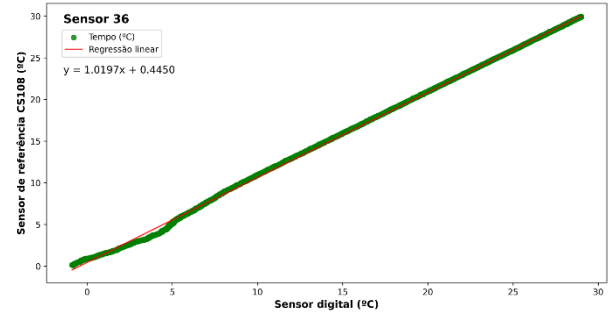
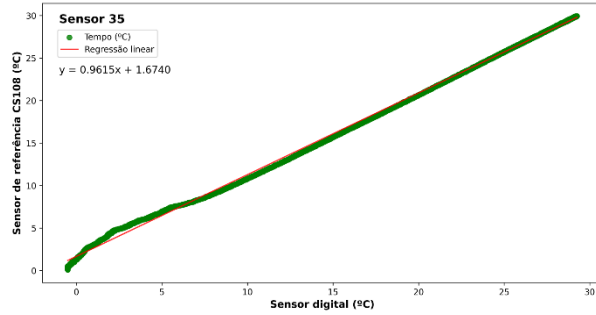
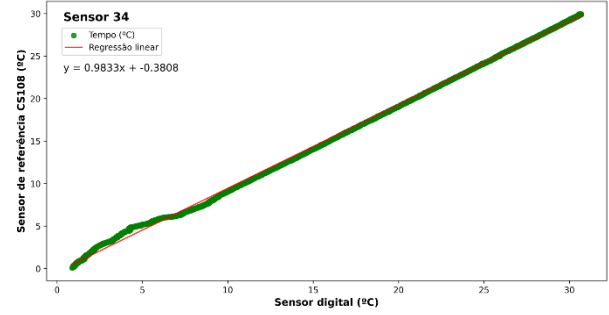
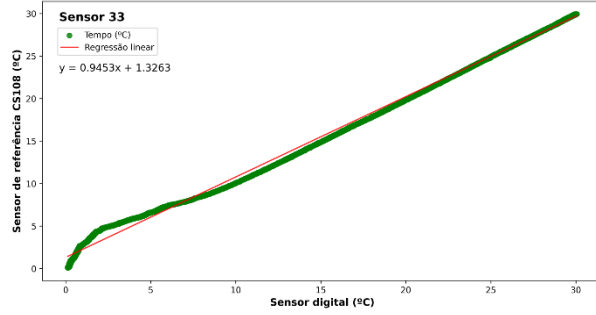
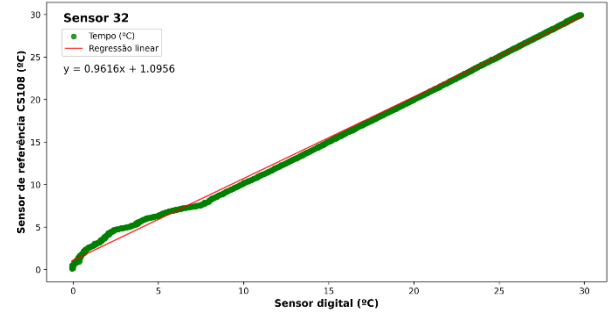
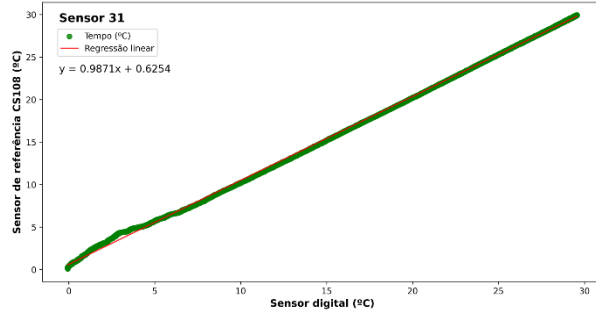


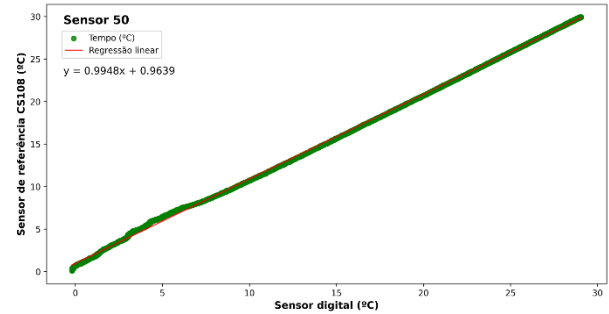
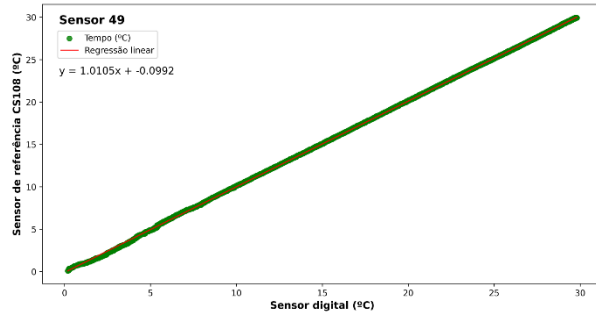
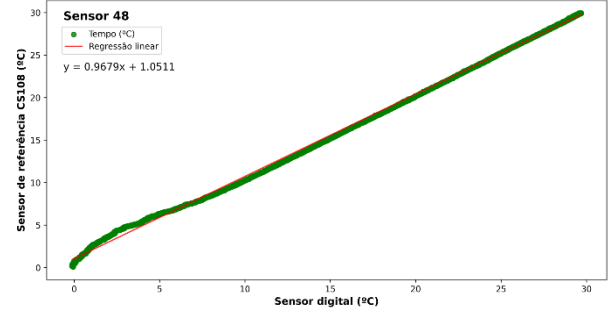
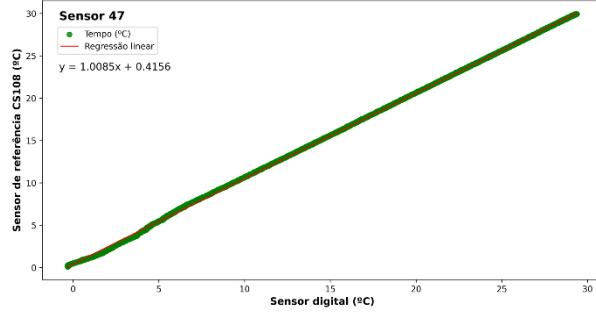
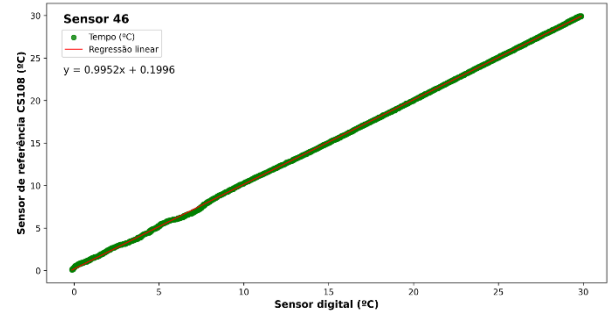
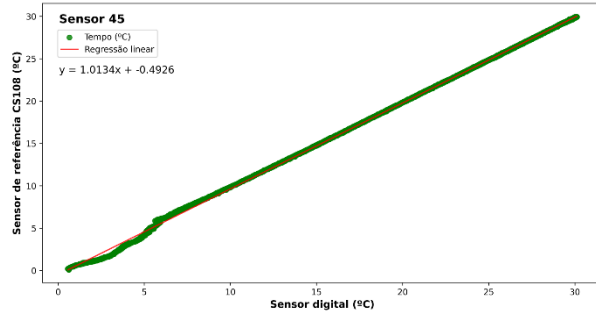
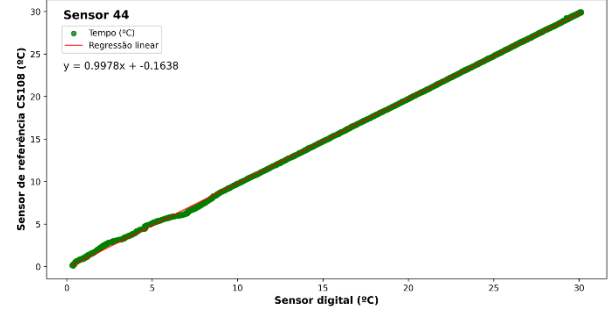
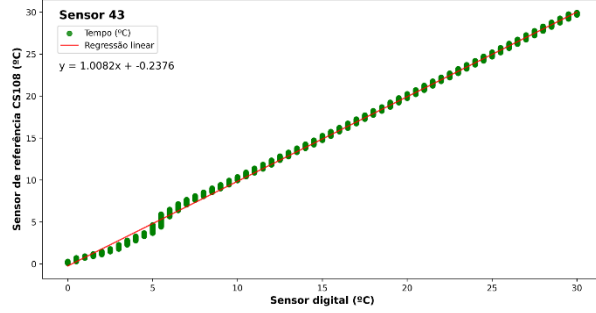
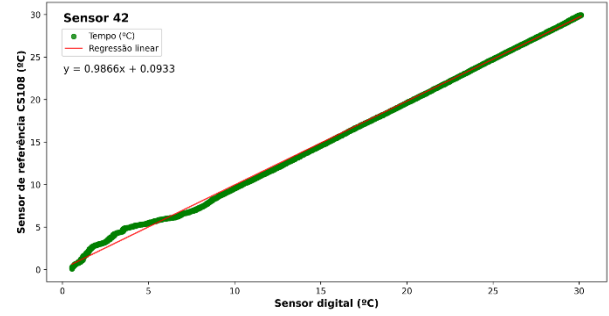
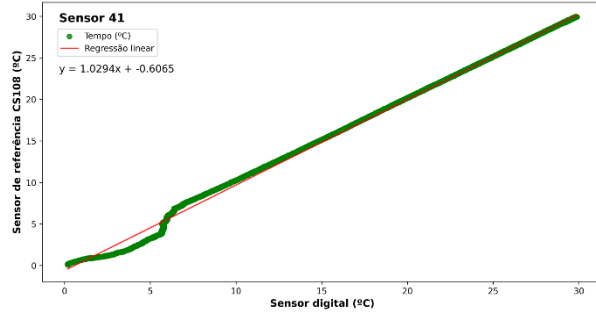
Gráficos Regressão Linear

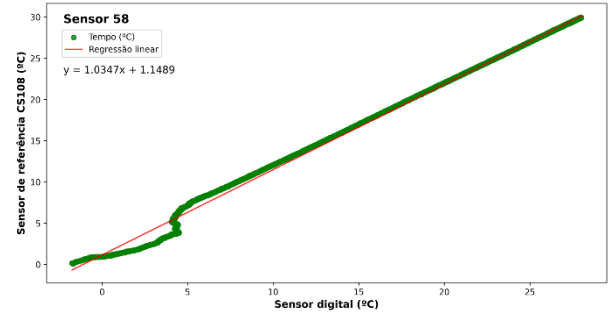
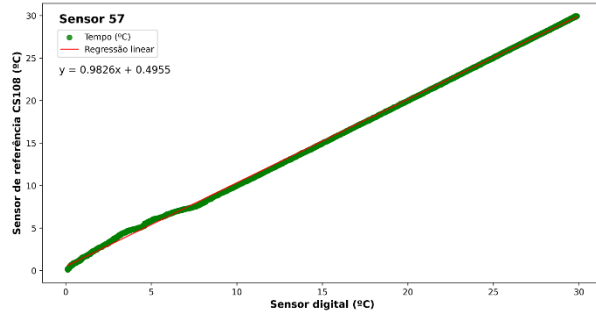
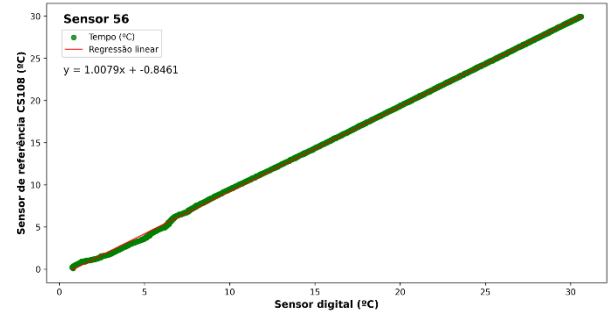
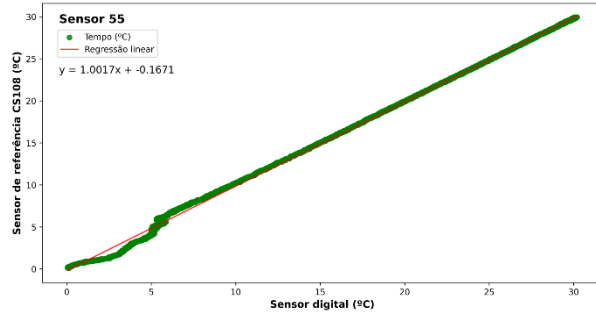
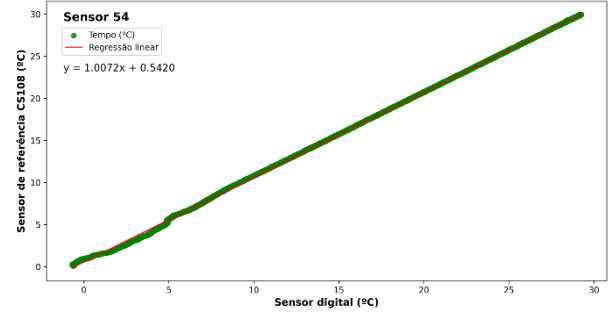
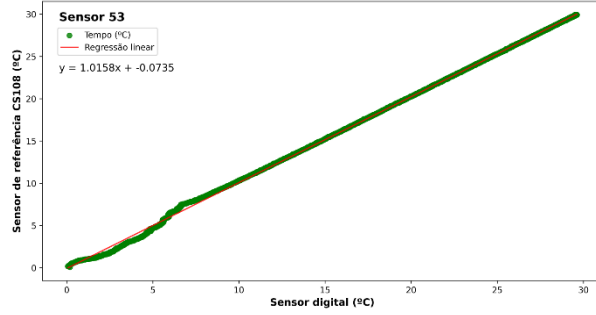
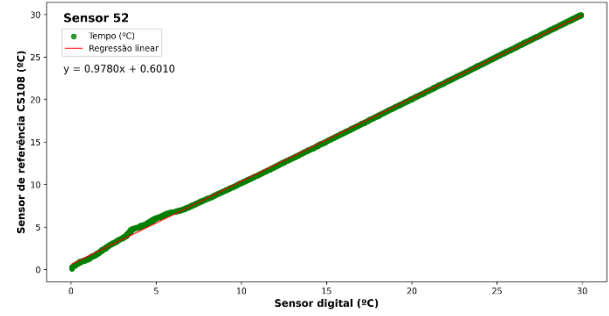
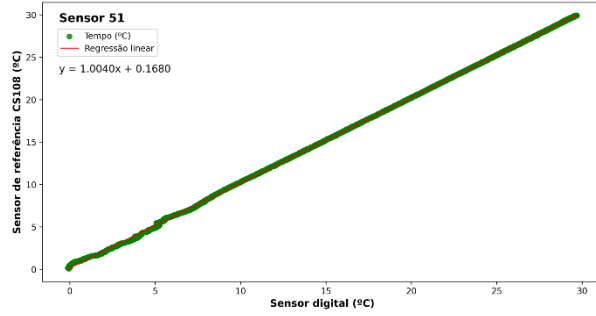












Gráficos Dados medidos e calibrados

