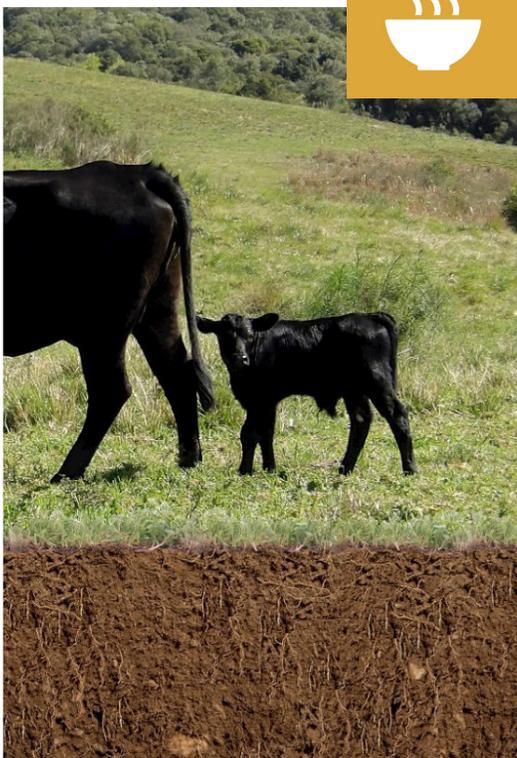


## Avaliação do estado de funcionamento do sistema edáfico campestre por sensores resistivos

**2** FOME ZERO E  
AGRICULTURA  
SUSTENTÁVEL



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Pecuária Sul  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

**BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
49**

**Avaliação do estado de funcionamento  
do sistema edáfico campestre  
por sensores resistivos**

*Leandro Bochi da Silva Volk  
José Pedro Pereira Trindade*

**Embrapa Pecuária Sul**  
Bagé, RS  
2021

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Pecuária Sul**  
BR 153, Km 632,9. Caixa postal 242  
796401-970 - Bagé - RS  
Fax: 55 (53) 32404650  
www.embrapa.br/pecuaria-sul  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Pecuária Sul

Presidente  
*Marcos Flávio Silva Borba*

Secretário-Executivo  
*Gustavo Trentin*

Membros  
*Gustavo Martins da Silva, Graciela Olivella Oliveira, Marco Antonio Karam Lucas, Ana Cristina Mazzocato, João Carlos Pinto Oliveira, Magda Vieira Benavides, Márcia Cristina Teixeira da Silveira, Lisiane Bassols Brisolará, Suplentes*  
*Emanuelle Baldo Gaspar e Jorge Luiz Sant'Anna dos Santos*

Supervisão editorial  
*Lisiane Bassols Brisolará*

Revisão de texto  
*Felipe Santos da Rosa*

Normalização bibliográfica  
*Graciela Olivella Oliveira*

Tratamento das ilustrações  
*Daniela Garcia Collares*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*Daniela Garcia Collares*

Foto da capa  
*Leandro Bochi da Silva Volk*

**1ª edição**  
Publicação digitalizada (2021)

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Pecuária Sul

---

Volk, Leandro Bochi da Silva

Avaliação do estado de funcionamento do sistema edáfico campestre por sensores resistivos / Leandro Bochi da Silva Volk, José Pedro Pereira Trindade. — Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2021.

PDF (44 p.).— (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Pecuária Sul, ISSN 1983-0467 ; 49)

1. Sensoriamento remoto. 2. Vegetação nativa. 3. Agricultura de precisão. 4. Solo. I. Trindade, José Pedro Pereira. II. Título. III. Série.

CDD 631.4

## Sumário

---

Resumo .....	4
Abstract .....	6
Introdução.....	8
Material e Métodos .....	10
Resultados e Discussão .....	13
Conclusões.....	42
Considerações finais .....	42
Referências .....	43

## Avaliação do estado de funcionamento do sistema edáfico campestre por sensores resistivos

Leandro Bochi da Silva Volk<sup>1</sup>

José Pedro Pereira Trindade <sup>2</sup>

**Resumo** – O monitoramento intensivo de sistemas edáficos pode ser uma ferramenta importante para a tomada de decisão na gestão de sistemas pastoris. Condição para que sistemas pecuários com base em campo nativo possam alcançar maior eficiência produtiva. Para tal, foi acompanhado e avaliado o desempenho de um sistema integrado de monitoramento com sensores resistivos para registro da dinâmica da resistência elétrica do solo e inferência do estado de funcionamento do sistema edáfico campestre. O monitoramento foi realizado em área da Embrapa Pecuária Sul, em Bagé/RS. O sistema é composto por quatro conjuntos de seis sensores agrupados por placas controladoras, sendo o armazenamento de dados feito por um computador modular. Os sensores foram instalados a 5 cm de profundidade, seguindo o padrão de amostragem preferencial sistemática com espaçamento entre eles de 1 m. A análise dos dados foi feita a partir da distribuição de frequência relativa e considerando o conjunto de dados como série temporal, a partir dos registros de resistência à condutividade elétrica, onde foram consideradas duas escalas espaciais e três escalas temporais. Considerando a totalidade dos sensores, observou-se diferenças nos descritores entre as estações do ano e entre as duas condições microclimáticas. Considerando o agrupamento dos sensores em transectas, observou-se diferença entre os descritores para todo o período, para as estações do ano e para as duas condições microclimáticas. Conclui-se que: a) o maior número de sensores, bem como sua sensibilidade e elevada frequência de registros permite trabalhar processos ou padrões em diferentes escalas espaciais e temporais, com distintos agrupamentos de sensores considerando sua localização e períodos de tempo; b) a amostragem preferencial sistemática na utilização de sensores demonstra ser uma estratégia eficiente para o monitoramento do sistema edáfico; c) a análise da dinâmica temporal em diferentes escalas (anual, estações do ano

---

<sup>1</sup> Doutor, pesquisador, Embrapa Pecuária Sul

<sup>2</sup> Doutor, pesquisador, Embrapa Pecuária Sul

e duas condições microclimáticas distintas) permitiu identificar a amplitude total de resistência elétrica ao qual o sistema edáfico foi exposto, bem como seu estado de funcionamento em cada período; d) a estratégia de análise e interpretação de dados de registro de sensores resistivos aplicados no monitoramento de sistemas edáficos permitiu a ampla caracterização do estado de funcionamento de sistemas edáficos.

**Termos de indexação:** Campo Nativo, Pecuária, Água no Solo, Sensoriamento, Agricultura de Precisão, Funcionamento do Solo, Solução eletrolítica

## Evaluation of grassland edaphic system dynamics by resistive sensors

**Abstract** – Intensive monitoring of edaphic systems can be an important tool for decision making in the management of livestock breeding systems. A condition for livestock breeding systems based on the grasslands to achieve greater productive efficiency. To this purpose, we monitor and evaluate the performance of an integrated monitoring system with resistive sensors to record the dynamics of the electrical resistance of the soil and inference of the edaphic system functioning status in livestock breeding systems. Monitoring was carried out in an area of Embrapa Pecuária Sul, in Bagé (RS/Brazil). The system consists of four sets of six sensors grouped by controller boards, with data storage done by a modular computer. The sensors were installed at a 5 cm depth, following the preferred systematic sampling pattern with spacing between them of 1 m. The analysis of the data was made from the relative frequency distribution and considering the data set as a time series, from the records of resistance to electrical conductivity. In both approaches, two spatial scales and three time scales are considered. Considering all the sensors, differences were observed in the descriptors between the seasons of the year and between the two microclimatic conditions. Considering the transects, a difference was observed between the descriptors for the entire period, for the year seasons and for two microclimatic conditions. We conclude that: a) the greater number of sensors, as well as their sensitivity and high frequency of records, allow to work processes or patterns in different spatial and temporal scales, with different grouping of sensors considering their location and time periods; b) the installation of sensors in transects (systematic preferential sampling) proves to be an efficient strategy for monitoring the edaphic system c) the analysis of the temporal dynamics at different scales (annual, seasons and two different climatic conditions) allowed to identify the total amplitude of electrical resistance to which the edaphic system was exposed, as well as its state of operation in each time period; and d) the strategy of analysis and;

d) the strategy of analysis and interpretation of resistive sensor registration data applied in the monitoring of edaphic systems allowed for a wide characterization of the functioning status of edaphic systems.

**Index terms:** Grassland, Livestock, Soil Water, Sensoring, Precision Agriculture, Soil Functioning, Eletrolitic solution

## Introdução

---

A necessidade crescente por estratégias de produção voltadas ao melhor aproveitamento dos potenciais naturais, com conservação dos recursos naturais na produção pecuária, tem gerado a necessidade de mecanismos eficientes para caracterização e monitoramento do estado e do funcionamento de sistemas edáficos (Havstad; Herrick, 2003). Sistemas produtivos pecuários dependem de recursos naturais (Pillar et al., 2009). Deste modo, o uso racional, dentro dos limites de cada recurso natural, é condição para que os sistemas produtivos pecuários alcancem o desenho produtivo desejado. O diagnóstico eficiente destes recursos naturais via monitoramento é uma ferramenta importante para esse objetivo (Havstad; Herrick, 2003).

A pecuária pastoril e sua estabilidade se caracteriza pelas relações complexas que se estabelecem com o solo, com a cobertura vegetal e com o impacto do manejo dos animais. O funcionamento do solo determina, mas também depende do funcionamento da vegetação, que por sua vez determina, mas também depende do funcionamento e do manejo da herbivoria (Altieri, 1999; Dias-Filho; Ferreira, 2009; Trindade et al., 2011; Volk; Trindade, 2020). Alguns processos desses sistemas podem ser considerados como indicadores de outros processos de difícil monitoramento, mas que são componentes igualmente importantes. Deste modo, o monitoramento destes processos indicadores e de seus padrões aproxima o entendimento do todo.

O solo, pela forte relação de dependência com a vegetação e fauna, é visto como um sistema (Vezzani; Mielniczuk, 2011) e é base do funcionamento da pecuária campestre. O sistema edáfico tem sua base nas fortes relações entre as frações mineral, química e orgânica, além da dependência do clima, da água e da atividade biológica, desde os microrganismos até plantas superiores e macrofauna (Vezzani; Mielniczuk, 2011; Volk; Trindade, 2020). Estas relações caracterizam o seu funcionamento ou a entrega das funções e serviços ecossistêmicos, como a regulação dos ciclos de carbono, de nitrogênio, de enxofre, a redução da erosão e do ciclo hidrológico, bem como de suporte de plantas, habitat de animais, armazenamento de água em corpos superficiais e muitos outros (Costanza et al., 1997; Ecosystems..., 2005).

Portanto, o entendimento do estado de funcionamento (ou o estado da dinâmica espacial e temporal das funções ou processos) do que reconhecemos por sistema edáfico é parte fundamental para o entendimento das relações solo-planta-animal em sistemas pecuários.

O uso de sensores, de modo geral, busca a coleta de informação de modo não-destrutivo (ou minimamente invasivo), além de permitir o registro de dados no mesmo local ao longo do tempo e permitir a obtenção de grande quantidade de dados em frequência que as metodologias padronizadas por vezes não permitem. No caso de acompanhamento do teor de água e de temperatura, existem diversos tipos de sensores com princípios distintos. Para o teor de água, existem os que medem a condutividade elétrica/térmica ou a capacitância, além da sonda de nêutrons, da atenuação de raios gama, o TDR (reflectometria no domínio de tempo), o FDR (reflectometria no domínio da frequência) e os tensiômetros (Hillel, 1998; Klein, 2014).

Com os recentes avanços em microeletrônica e na computação, existem incontáveis iniciativas (profissionais e amadoras) de desenvolvimento de sensores e de sistemas para o monitoramento do solo. Alguns desses sensores ainda encontram limitações para serem utilizados diretamente no campo, passando pelo custo alto do próprio sensor e do sistema para a aquisição dos dados, pela imposição quanto ao formato e frequência dos dados coletados, bem como a limitação imposta pela necessidade de energia elétrica dos equipamentos envolvidos. Neste contexto, uma das alternativas mais simples é o uso de sensores resistivos, que têm por base o monitoramento da resistência à condutividade elétrica.

A condução de eletricidade no sistema edáfico é essencialmente eletrolítica. Ela é fortemente determinada por atributos edáficos como o teor de água e de sais dissolvidos na solução do solo, mas sofre interferência da composição e proporção da fração sólida (areia, silte, argila e matéria orgânica), da estrutura ou espaços de vazios e da temperatura (Rhoades et al., 1989; Samouëlian et al., 2005). A resistência é a recíproca da condutância elétrica, portanto é determinada pelos mesmos atributos edáficos.

O estado de funcionamento do sistema edáfico (ou dinâmica no tempo e no espaço da capacidade do sistema edáfico em entregar suas funções ecossistêmicas) é reflexo da interação destes mesmos atributos, definindo também a natureza da resistência elétrica identificada por sensores resistivos.

Pode-se assumir, assim, que as oscilações da resistência elétrica do solo sejam associadas às modificações, no tempo e no espaço, destes atributos e, portanto, ao seu funcionamento.

O uso da resistência elétrica do solo como um indicador do seu estado é bem documentado. Já é conhecida a relação entre a resistência elétrica e propriedades físicas do solo (Rhoades et al., 1989; Samouëlian et al., 2005), bem como com a fertilidade química (Johnson et al., 2005; Molin et al., 2005; Carmo; Silva, 2016).

Para o monitoramento em condições a campo por sensores resistivos, algumas características podem ser elencadas como desejáveis para o sistema proposto: a) construção simples, com o uso de materiais acessíveis; b) fácil manutenção e conferência de todo o sistema; c) controle sobre todos os elementos do sistema; d) maior número possível de sensores acoplados ao mesmo sistema; e) frequência alta de coleta, com intervalo de tempo menor que 1 hora; e f) elevada sensibilidade e de rápida resposta, confiáveis e com repetibilidade quanto as mudanças de estado do processo monitorado.

Com isso em mente, foi acompanhado e avaliado o desempenho de um sistema integrado de monitoramento com sensores resistivos para registro da dinâmica da resistência elétrica do solo e inferência do estado de funcionamento do sistema edáfico campestre.

Esta publicação contribui com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2 (ODS 2) contido na agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas, cujo objetivo visa “garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo”.

## Material e Métodos

---

O sistema edáfico monitorado caracteriza-se pela vegetação natural campestre sem histórico agrícola, pertencente à Embrapa Pecuária Sul, Bagé/RS. Durante todo o período de monitoramento a área se manteve com manejo do pastejo intermitente (os animais tinham acesso controlado à área).

A coleta de dados ocorreu no período de 20/11/2019 a 15/12/2020. Para a inferência do comportamento meteorológico, foram utilizados os dados meteorológicos coletados pela Estação Meteorológica Automática do Inmet localizada na Embrapa Pecuária Sul para esse mesmo período.

A mensuração da dinâmica da condutividade elétrica do solo foi feita através de 24 sensores resistivos de cobre com dimensões de 1 cm de comprimento e 2 mm de diâmetro, que ficavam em contato direto com o solo. Os sensores foram instalados de forma a monitorar a condutividade elétrica em profundidade de 5 cm em área representativa da paisagem local. Como critério de localização, os sensores foram alocados em quatro transectas (linhas de 6 sensores) com intervalos de 1 metro entre sensores e entre linhas, seguindo o esquema de amostragem preferencial sistemática. Tal desenho experimental foi escolhido considerando a homogeneidade do solo monitorado (15 m<sup>2</sup>), a distância entre sensores (1 m, sem interferência mútua, mas sujeitos a mesma interferência meteorológica) e o número de repetições por transecta (considerando como pertencentes a mesma transecta os seis sensores da mesma placa controladora).

O sistema de monitoramento consiste de um conjunto de sensores, um módulo de controle e aquisição de dados e um módulo de registro e armazenamento dos dados. Para o controle dos 6 sensores, simultaneamente, e aquisição dos dados utilizou-se uma placa controladora com microprocessador ATmega328. Cada placa controladora foi programada para ciclos de leituras de 1 minuto. Para o registro e armazenamento de dados utilizou-se um microcomputador modular com processador ARM que se conecta por saídas USB com as placas controladoras.

Os dados obtidos pelos sensores foram transformados em resistência elétrica, considerando a fórmula:

$$R_s = \frac{(R_p \times V_e)}{f_c \times L} - R_p \quad (1)$$

Sendo: ***R<sub>s</sub>*** a resistência elétrica do solo (medida em kOhms), ***R<sub>p</sub>*** o valor de resistor utilizado na placa (medido em kOhms), ***V<sub>e</sub>*** o valor da voltagem que a placa envia ao sistema (medido em Volts), ***f<sub>c</sub>*** é o fator de transformação em Volts e ***L*** o valor da leitura dada pela placa.

Os dados coletados de resistência elétrica pelo sistema foram analisados quanto ao seu histograma e como séries temporais. A partir da contagem de ocorrência dos valores individuais foram construídos os histogramas de frequência relativa e calculadas medidas descritivas como resistência elétrica mínima (RE mínima), máxima, (RE máxima), média (RE média), mediana (RE mediana), mais frequente (RE mais frequente), valor que representa 50% e 90% das observações (50% e 90% das RE, respectivamente). Com a intenção de entender a tendência temporal dos dados, cada série temporal foi decomposta pela metodologia STL (Cleveland et al., 1990).

Para análise exploratória de tendência aplicada às medidas descritivas foi utilizada Análise de Coordenadas Principais com uso do aplicativo MULTIV (Pillar, 2004).

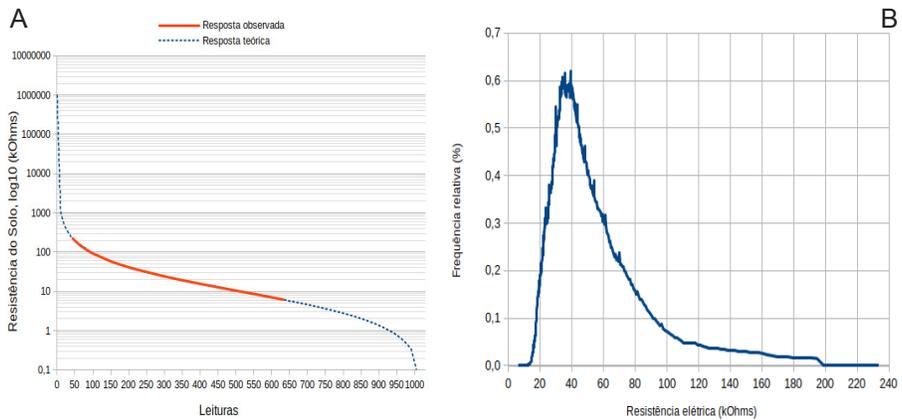
## Resultados e Discussão

---

No período desse estudo, foram utilizados registros de 24 sensores agrupados em 4 transectas de 6 sensores, por um período de 390 dias de monitoramento. Como resultado, cada sensor localizado no campo produziu 60 registros por hora, 1440 registros por dia em cada sensor, 3.110.400 registros a cada 3 meses de monitoramento, gerando mais de 13.000.000 de registros acumulados.

Um dos desafios de sistemas de monitoramento é a grande quantidade de dados coletados e armazenados. Propomos como estratégia a análise destes resultados a partir de duas abordagens. Uma, a partir da distribuição de frequência relativa e outra, considerando o conjunto de dados como série temporal, a partir dos registros de resistência à condutividade elétrica. Nas duas abordagens, são consideradas duas escalas espaciais (a totalidade do conjunto de dados e o agrupamento dos sensores por transecta) e 3 escalas temporais (considerando a totalidade dos dados, por estação climática e em dois períodos de pluviometria contrastantes).

Na Figura 1A são apresentados a comparação da amplitude de resistência elétrica que o sistema integrado permite e a amplitude de resistência registrada durante o período de avaliação. Na Figura 1B é apresentado o histograma de distribuição de frequências relativas dos dados coletados, registrados e armazenados pelo sistema integrado de monitoramento entre os dias 20/11/2019 e 15/12/2020.



**Figura 1.** Representações da totalidade dos dados: (A) Amplitude teórica e observada dos valores de leituras e de resistência elétrica do solo nos sensores durante o período de estudo. (B) Histograma da distribuição da frequência relativa dos dados. (A frequência é relativa ao total dos dados coletados no período entre 20/11/2019 e 15/12/2020, totalizando 12.782.223 registros não nulos).

Na totalidade dos dados, o valor mínimo observado foi de 6,1 kOhms (leitura de 635 ou 3,10 V) e o valor máximo de resistência elétrica observado foi de 198,8 kOhms (leitura de 42 ou 0,21 V). Um sistema permitindo a total condutividade elétrica aplicada (5 V) teria em seu registro o valor zero de resistência elétrica. Por outro lado, o mesmo sistema edáfico incapaz de conduzir eletricidade, teria valor de resistência elétrica registrado próximo a 102.290 kOhms (leitura de 0,1 e tensão elétrica de 0,000488 V) pelos sensores (Figura 1A). Pode-se, assim, considerar que o sistema edáfico monitorado, em um período de 390 dias, não foi submetido a períodos de completa saturação por água, ou completa ausência de água no solo. De modo geral, a oscilação dos teores de água no solo se relaciona com a infiltração de água da chuva, a drenagem para maiores profundidades, com a retenção pela argila, com a evaporação, com a absorção de água e nutrientes pelas plantas, entre outros (Volk; Trindade, 2020).

Observa-se que a amplitude de valores de resistência elétrica do solo registrada durante o período de estudo correspondeu a 56,2% da amplitude teórica possível do sistema integrado de monitoramento proposto.

Existe uma relação inversa e logarítmica entre as leituras de condutividade elétrica e a resistência elétrica do sistema edáfico em avaliação, como se pode observar na Figura 1A. Quanto maiores as leituras de condutividade elétrica registradas pelo sistema, menores serão os valores de resistência elétrica. Essa resposta segue o modelo logarítmico negativo, explicado pela equação (1).

A partir da forma com que os dados são apresentados na Figura 1B, pode-se perceber a ocorrência de valores que permitam descrever o estado de funcionamento do sistema.

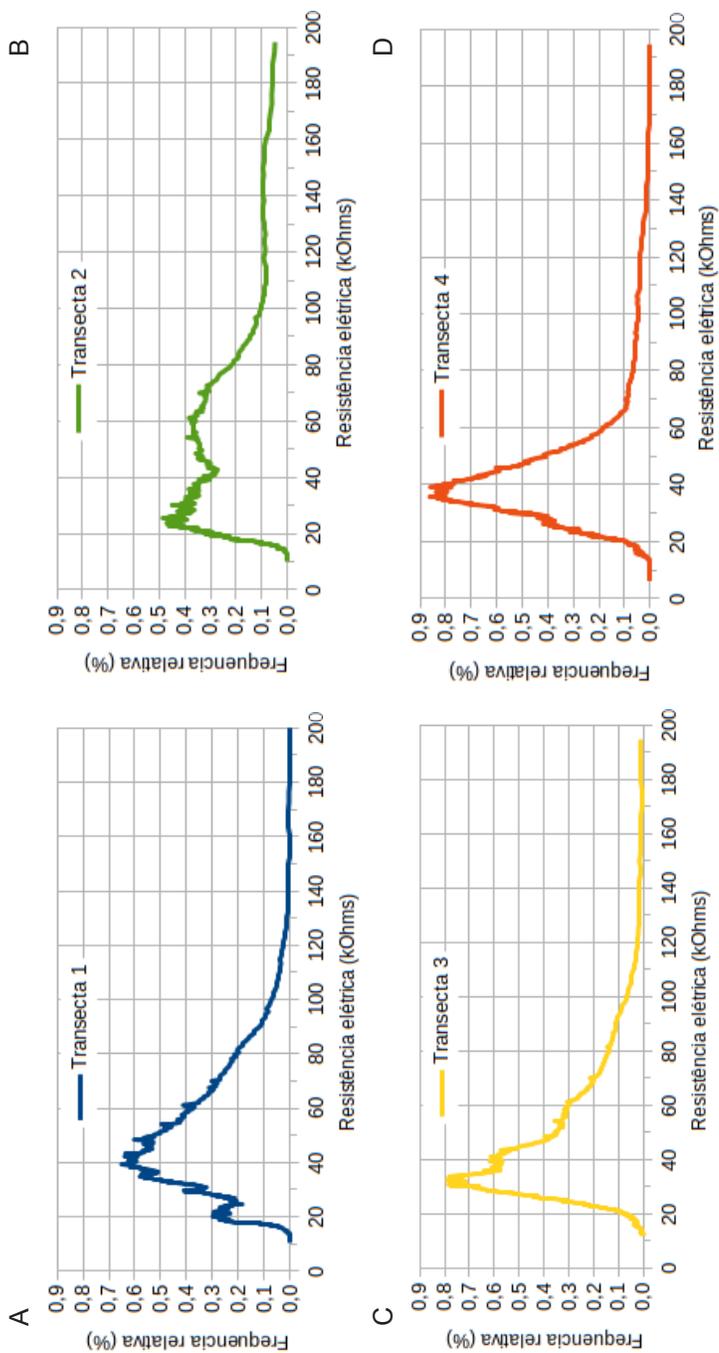
Percebe-se que não há distribuição normal na frequência relativa (Figura 1B). A curva é assimétrica à esquerda, sendo o menor valor de registro de 6,1 kOhms e o maior de 198,8 kOhms. Contudo, a maior parte dos registros observados, cerca de 90%, ficaram entre 20 kOhms (1,65 V) e 90 kOhms (0,49 V). Metade da ocorrência de valores da resistência elétrica observada foi de 35 kOhms, o que corresponde a 1,09 V (21,8% da tensão aplicada). Assim, na maior parte do tempo, o sistema pode ser caracterizado por permitir a passagem de menos de  $\frac{1}{4}$  da tensão total aplicada.

Observa-se que a máxima condutividade elétrica registrada (3,10 V ou 6,14 kOhms) corresponde a 62% da tensão aplicada (5 V) e que tal registro ocorreu uma vez em 12.782.223 de registros totais. Por outro lado, a mínima condutividade elétrica registrada (0,21 V ou 233,57 kOhms) corresponde a 4,2% da tensão aplicada (5 V) e tal registro ocorreu três vezes.

O período de estudo permitiu a observação de uma ampla faixa de valores possíveis, demonstrando que o intervalo de tempo pode ser considerado suficiente para avaliar o poder de resposta do sistema integrado de monitoramento proposto, além de estabelecer uma correlação com o estado de funcionamento do sistema edáfico monitorado.

A partir da interpretação dos dados apresentados na Figura 1, é proposto a mesma lógica de análise para grupos de sensores em transectas.

Na Figura 2 são apresentados histogramas com frequências relativas dos valores de resistência do solo por transecta no período entre 20/11/2019 e 15/12/2020.



**Figura 2.** Histogramas da frequência relativa das 4 transectas de sensores instalados em solo sob Campo Nativo no período entre 20/11/2019 e 15/12/2020. (A) Registro de grupo de sensores da Transecta 1; (B) Registro de grupo de sensores da Transecta 2; (C) Registro de grupo de sensores da Transecta 3; e (D) Registro de grupo de sensores da Transecta 4.

Como se pode observar na Figura 2, os histogramas são assimétricos à esquerda e não apresentam distribuição normal, mesmo comportamento observado pela totalidade dos dados apresentados na Figura 1B. Contudo, quando os dados são analisados por grupos de sensores em transectas, se percebe distribuições distintas entre elas, principalmente quando se compara os quatro grupos a partir dos picos de frequência de registros de resistência elétrica. Observa-se também que os histogramas das transectas 1 e 2 são bimodais, enquanto este comportamento não é observado nas transectas 3 e 4.

Na Tabela 1 são apresentados valores descritivos dos histogramas apresentados na Figura 2.

**Tabela 1.** Medidas descritivas de resistência elétrica (RE, kOhms) de registros por grupos de sensores (transectas). Relativos aos dados apresentados na Figura 2.

Descritores	Transecta 1	Transecta 2	Transecta 3	Transecta 4
RE mínima	10,2	9,98	11,8	6,1
RE máxima	198,8	194,6	194,6	194,6
RE média	47,7	41,6	44,9	41,1
RE mais frequente	42,2	25,5	32,6	35,7
RE mediana	37,6	32,1	34,5	35,5
90% das RE	64,1	71,2	60,1	52,4

Em se considerando os histogramas da Figura 2 e os quantitativos das medidas descritivas contidos na Tabela 1, percebe-se um comportamento distinto entre as transectas para a resistência elétrica mínima, média, mais frequente, mediana e de 90% dos valores. Este comportamento terá reflexo no estado dos descritores quando se considera a tensão elétrica. Nos sensores da transecta 1 foi onde se observou o máximo valor de resistência elétrica (198,8 kOhms, equivalente a 0,20 V), com maior média (47,7 kOhms, equivalente a 0,87 V) e maior valor de resistência elétrica mais frequente (42,2 kOhms, equivalente a 0,95 V). Quando representamos os dados contidos na Tabela 1 na forma de análise exploratória utilizando-se métodos de ordenação, como é apresentado na Figura 3, pode-se comparar de modo mais claro a resposta expressa nas medidas de resistência de cada um dos grupos de sensores em transectas.



**Figura 3.** Diagrama de ordenação de grupos de sensores em transectas (Transecta 1 a 4) em função das medidas descritivas dos registros por grupos de sensores e apresentados na Tabela 1. O diagrama foi gerado considerando as 6 medidas descritivas apresentadas na Tabela 1.

Quando agrupados os dados em transectas, e considerando as medidas descritivas das frequências relativas de resistência elétrica apresentadas na Tabela 1 e na análise exploratória expressa na Figura 3, percebe-se que as transectas 1 e 2 se destacam isoladas nos quadrantes 1 e 3, respectivamente, do diagrama de ordenação. As transectas 3 e 4 podem ser consideradas como de resposta com características similares, no quadrante 4 do mesmo diagrama, confirmando as tendências de diferença perceptível nos histogramas de frequências apresentados na Figura 2.

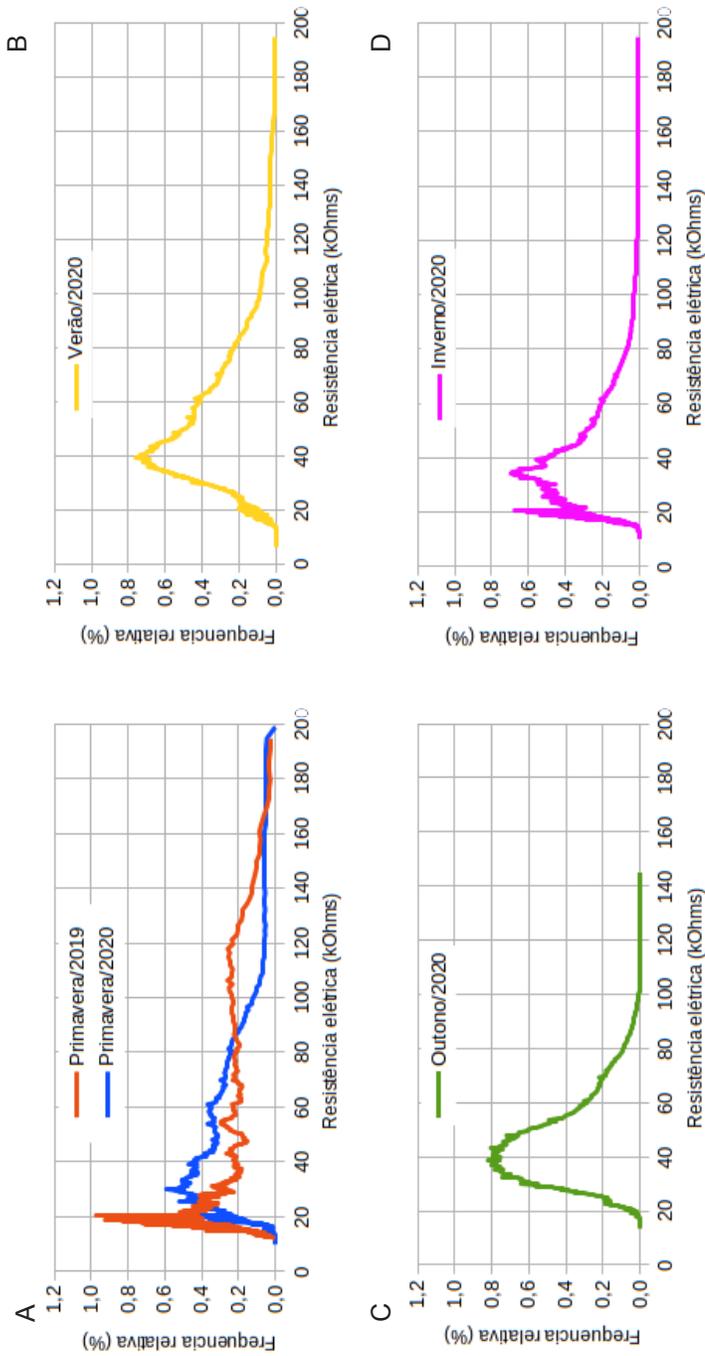
Pelos resultados apresentados de forma sintética na Figura 3, a partir dos histogramas dos dados das transectas, pode-se afirmar que o sistema edáfico monitorado pelo grupo de sensores das transectas 1 e 2 apresentaram comportamento distinto, enquanto as transectas 3 e 4 foram relativamente similares entre si, considerando que as 4 transectas monitoradas descrevem 24 sistemas edáficos diferentes (6 sensores em cada uma das 4 linhas de transectas), correspondente a uma superfície de 15 m<sup>2</sup>. Se espera, portanto, a inexistência de diferença relativa à classe de solo. Os resultados quando agrupados em transectas, no entanto, nos mostram diferentes respostas à resistência à condutividade elétrica.

Ainda que a condutividade elétrica do solo seja determinada pela relação entre os seus determinantes, é importante ressaltar que a oscilação destes fatores ocorre em escala temporal diferente. Podemos assumir que a oscilação natural da fase sólida do solo (proporção de areia, silte, argila e matéria orgânica), a estrutura e o espaço de vazios necessitam de um intervalo de tempo muito grande para ocorrer. Exceção a esse princípio seria a ocorrência de alguma perturbação externa muito forte, como a mobilização do solo por máquinas, o pisoteio muito intenso por animais ou adição de adubos solúveis. Por outro lado, a oscilação natural dos teores de água, dos teores de sais dissolvidos e de temperatura ocorrem em intervalos de tempo muito menores (Rhoades et al., 1989; Johnson et al., 2005; Molin et al., 2005; Samouëlian et al., 2005; Carmo; Silva, 2016).

A oscilação dos teores de água e de temperatura são indicadores do estado de funcionamento de inúmeros processos relativos à dinâmica da água e de vegetação. A temperatura do solo, por exemplo, tem sua variação em função da temperatura do ar e da taxa de cobertura do solo por liteira ou pelas plantas vivas. Ao mesmo tempo, a temperatura do solo afeta a evaporação da água, a transpiração das plantas, a atividade da fauna edáfica, a emissão de gases, entre outros.

Portanto, o monitoramento da resistência elétrica do solo, que pode ser feita em escala temporal de minutos, tem sua oscilação explicada pela combinação do efeito dos fatores determinantes do funcionamento do sistema edáfico e do ambiente (como o teor de água e temperatura), nos permitindo fazer inferências ao estado do funcionamento de vários processos.

A partir de uma abordagem geral, tendo por base a interpretação das Figuras 1 e 2, e com a intenção de olhar os dados em outra escala temporal, é proposto a mesma lógica de análise e interpretação dos resultados, mas agrupados por estações do ano, considerando o período total de avaliação. Deste modo, o conjunto de dados dos sensores podem ser agrupados em combinações de períodos de estações do ano e entre anos: primavera de 2019, verão de 2020, outono de 2020, inverno de 2020 e primavera de 2020 (Figura 4).



**Figura 4.** Histogramas da frequência relativa da resistência elétrica do solo monitorada em todos os sensores e agrupada em 5 estações no período entre 20/11/2019 e 15/12/2020. (A) Primavera de 2019 e Primavera de 2020; (B) Verão de 2020; (C) Outono de 2020; e (D) Inverno de 2020.

Na Figura 4, é possível verificar que os histogramas são assimétricos à esquerda e não apresentam distribuição normal. As distribuições indicam que a maior frequência de leituras ocorre em valores mais baixos de resistência elétrica, considerando a amplitude de todos os dados observados. A assimetria na frequência dos dados também foi observada nas Figura 1B, onde são apresentadas a totalidade dos dados, bem como na Figura 2, quando os registros de resistência elétrica dos sensores foram agrupados por transectas.

Na comparação entre a Primavera de 2019 e de 2020, uma tendência de comportamento distinto da resistência à condutividade elétrica no sistema edáfico descrito pelos sensores na mesma estação, mas em anos diferentes (Figura 4A). Evidencia-se que os extremos (valores máximos e mínimos) são similares entre si, bem como a distribuição. Pode-se destacar, contudo, que na Primavera de 2019 aproximadamente 1% dos valores totais estavam em torno de 20 kOhms, enquanto na Primavera de 2020 aproximadamente 0,6% dos valores entorno de 30 kOhms. Também se observa que na Primavera de 2019 ocorreram frequências relativas de aproximadamente de 0,2% para registros de resistência elétrica entre 40 e 120 kOhms, enquanto para este mesmo intervalo, as frequências relativas na Primavera de 2020 foram decrescentes.

Na Tabela 2 são apresentadas medidas descritivas relativas dos dados da Figura 4.

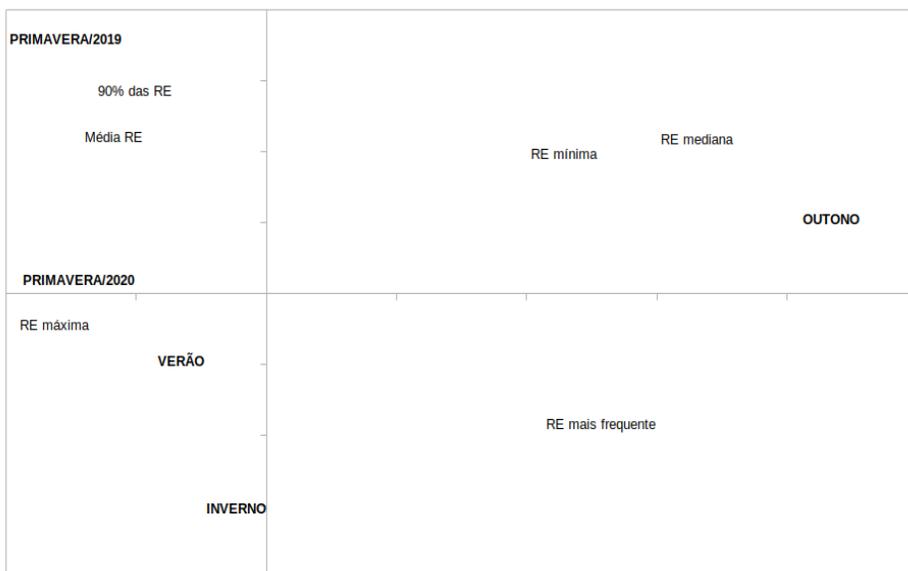
**Tabela 2.** Medidas descritivas de resistência elétrica (RE = resistência elétrica em kOhms) registrados pela totalidade dos sensores agrupados por estações, relativas aos dados apresentados na Figura 4.

Descritores	Primavera 2019	Verão 2020	Outono 2020	Inverno 2020	Primavera 2020
RE mínima	12,0	6,1	13,5	10,0	9,9
RE máxima	194,6	194,6	145,0	194,6	198,8
RE média	48,8	47,6	46,3	46,8	47,1
RE mais frequente	33,5	32,5	35,1	31,8	31,8
RE mediana	20,4	39,2	39,2	34,3	30,0
90% das RE	84,7	67,5	56,4	52,0	71,2

Em se analisando a Tabela 2, no verão de 2020, os sensores registraram a RE mínima mais baixa e no outono de 2020 a RE mínima mais alta. Com esta análise, identificou-se que o menor valor de resistência elétrica identificado na análise da Figura 1 ocorreu, portanto, no verão de 2020 (Tabela 3) e no grupo de sensores representados pela transecta 4 (Tabela 2). O maior valor de resistência elétrica ocorreu na primavera de 2020 e no grupo de sensores da transecta 1 (Tabela 2).

O outono de 2020 se destaca também por apresentar o menor valor de RE máxima e, por conseguinte, de RE média mais baixa. Por outro lado, a RE mais frequente foi superior no outono de 2020. Ao mesmo tempo, a RE mediana foi mais alta no período do outono e no verão de 2020. Em 90% dos registros das resistências elétricas o valor observado no outono foi de 56,4 kOhms, sendo maior apenas que o do inverno de 2020. Para as medidas descritivas na comparação de tendência entre as primaveras de 2019 e 2020, as resistências elétricas relativas aos valores máximos, médios e mais frequentes não diferem muito (Tabela 2). Por outro lado, a resistência elétrica de 90% (84,7 kOhms e 71,2 kOhms, respectivamente) foi aproximadamente 19% maior na primavera de 2019, e a resistência elétrica mediana (20,4 kOhms e 30,0 kOhms, respectivamente) foi aproximadamente 47% maior na primavera de 2020. Estas medidas descritivas sugerem que, na primavera de 2019, o sistema edáfico monitorado apresentou maior resistência elétrica do que no mesmo período em 2020.

A partir das medidas descritivas dos dados de resistência elétrica da Tabela 2, é apresentado diagrama de ordenação das estações do ano (da primavera de 2019 à primavera de 2020) na Figura 5.



**Figura 5.** Diagrama de ordenação de grupos de sensores nas cinco estações do ano (Primavera/2019, Verão, Outono, Inverno e Primavera/2020) em função das medidas descritivas dos registros por grupos de sensores e apresentados na Tabela 2. O diagrama foi gerado em se considerando as 6 medidas descritivas apresentadas na Tabela 2.

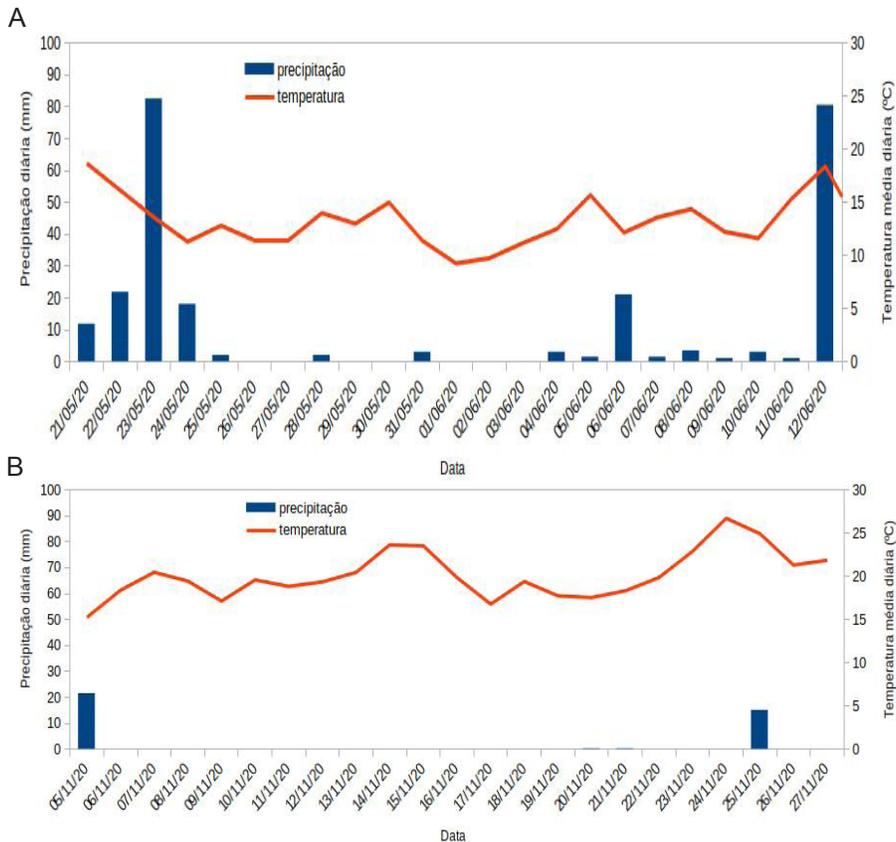
Na Figura 5 pode-se comparar de modo mais claro a resposta expressa nas medidas de resistência de cada um dos grupos de sensores nas estações climáticas, em se considerando todos os descritores apresentados na Tabela 2. Os maiores valores de resistência elétrica mediana e mais frequente, bem como o menor valor de resistência elétrica máxima destacaram de modo isolado a estação do outono no quadrante 1. Uma tendência de comportamento distinto em relação às demais estações climáticas.

Os valores mais altos de 90% da RE e de RE média foram registrados na primavera de 2019, enquanto o comportamento inverso destacou o inverno de 2020 na parte inferior do quadrante 3. Ao mesmo tempo, a ordenação indica similaridade de comportamento da resistência elétrica entre as estações do verão e primavera de 2020.

Destaca-se, portanto, que o sistema integrado de monitoramento, bem como a metodologia proposta de análise dos dados conseguiu identificar distinções entre as dinâmicas das resistências elétricas e do estado de funcionamento do mesmo sistema edáfico nas diferentes estações do ano.

Ainda considerando a observação em escala temporal menor que a de estações do ano apresentada nas Figuras 4 e 5, bem como na Tabela 2, é apresentada a análise do comportamento do sistema integrado de monitoramento do sistema edáfico em dois eventos climáticos escolhidos. Com o propósito de descrever o comportamento dos sensores, é proposta a análise da dinâmica do registro de dados de grupos de sensores arranjados em transectas em duas condições climáticas distintas - um momento com excesso de precipitação associado às temperaturas diárias mais amenas (Figura 6A) e outro, com escassez de precipitação associado com temperaturas mais altas (Figura 6B).

Como se pode observar na Figura 6A, o primeiro período se refere ao intervalo de 23 dias (entre 21/05/2020 e 12/06/2020), quando ocorreram eventos de precipitação a cada dois dias, em média, e acumulado de 235 mm. Essa condição de excesso hídrico foi associada à temperatura média diária do ar abaixo de 14°C. Na Figura 6B, o segundo período se refere ao intervalo de 22 dias (entre 05/11/2020 e 27/11/2020) quando ocorreram duas precipitações e temperaturas médias diárias do ar acima de 21°C. Foi registrada precipitação de 21,4 mm no dia 05/11/2020 e outra de 15,2 mm no dia 25/11/2020.



**Figura 6.** Precipitação e temperatura média do ar na Estação Meteorológica da Empresa Pecuária Sul (Bagé/RS) nos períodos escolhidos: A – Período 1, entre 21/05/2020 e 12/06/2020 e B – Período 2, entre 05/11/2020 e 27/11/2020.

A Figura 7 traz ilustrações do estado da cobertura vegetal campestre representativa dos dias 29/05/2020 (Figura 7A) e 18/11/2020 (Figura 7B).

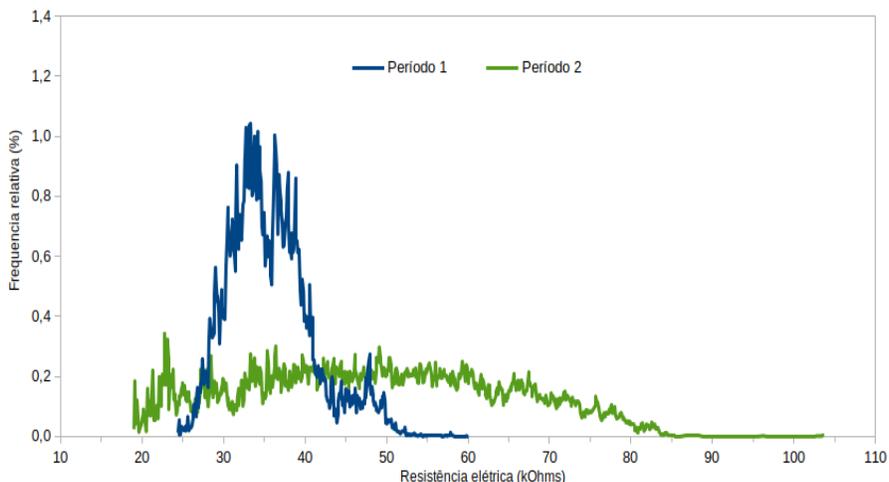


Fotos: Leandro Volk

**Figura 7.** Representação do estado da cobertura vegetal campestre representando o seu estado em cada período. A - Registro feito em 29/05/2020, B - Registro feito no dia 18/11/2020.

Pode-se perceber na Figura 7A, referente ao período 1, que a vegetação campestre está em pleno crescimento e representa estar sem limitações impostas pelo sistema edáfico. Na Figura 7B, referente ao período 2, percebe-se que a vegetação campestre está com as folhas encarquilhadas e representa que existe limitação imposta pela insuficiência de água disponível no sistema edáfico. Pelo entendimento que esses dois períodos representam situações muito distintas de estado de funcionamento do sistema edáfico, se justifica a escolha deles para a segmentação do tempo proposta.

A Figura 8 apresenta histogramas de distribuição da frequência relativa dos valores observados de todos os sensores agrupados nos dois períodos descritos na Figura 6.



**Figura 8.** Histogramas da frequência relativa da resistência elétrica do solo monitorada em todos os sensores e agrupada em dois períodos: Período 1, entre 21/05/2020 e 12/06/2020 e Período 2, entre 05/11/2020 e 27/11/2020.

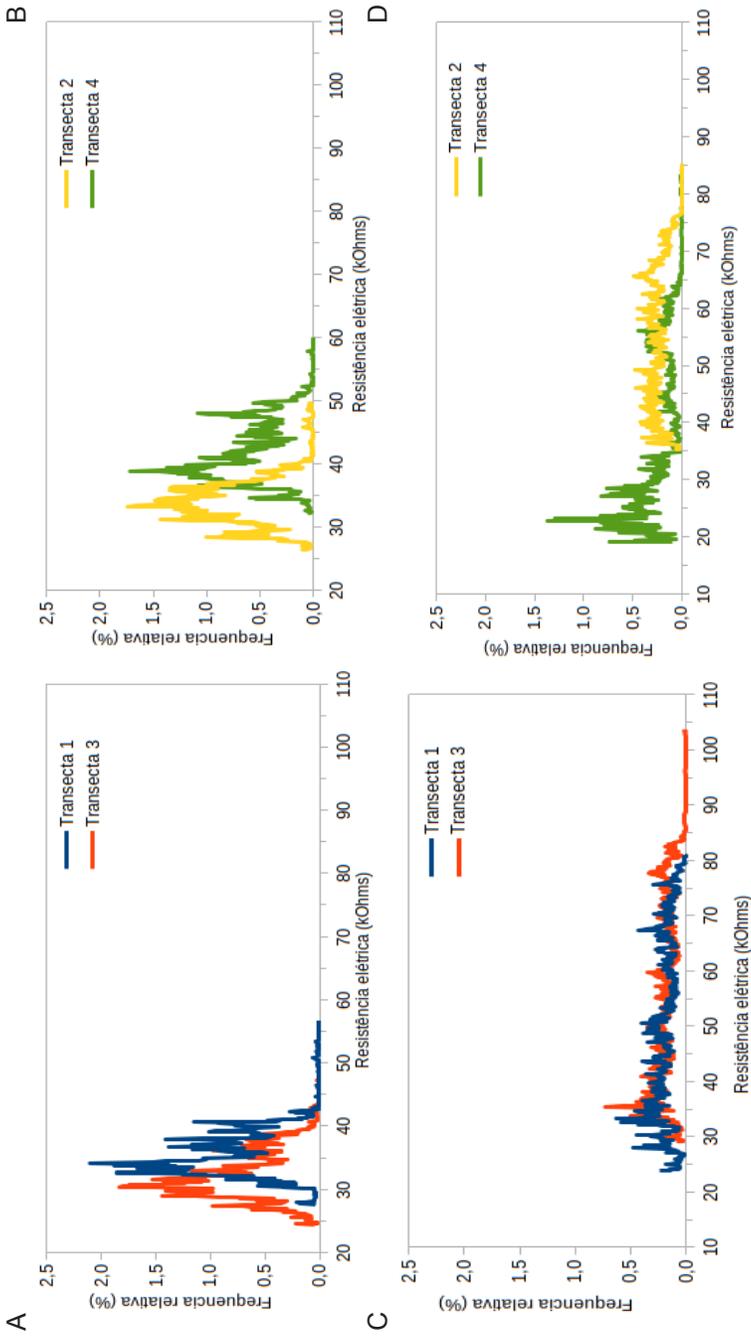
Os dados meteorológicos apresentados na Figura 6 descrevem dois períodos que podem ser considerados diferentes quando a disponibilidade de água no sistema edáfico. A água na solução do solo é um dos importantes fatores determinantes da resistência à condutividade elétrica do solo (Rhoades et al., 1989). Na Figura 8, os sensores de monitoramento da resistência elétrica registraram comportamento compatível com a hipótese de registros meteorológicos da Figura 7. Isto pode ser percebido pela natureza da curva de resposta da distribuição de frequências e nos valores dos descritores apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Medidas descritivas de resistência elétrica (RE, kOhms) registrados pela totalidade dos sensores agrupados por períodos de tempo, relativas aos dados apresentados na Figura 8.

Descritores	Período 1	Período 2
RE mínima	24,4	19,0
RE máxima	60,1	103,7
Média RE	42,2	55,7
RE mais frequente	35,1	22,8
RE mediana	42,2	55,1
90% das RE	42,7	70,3

No período 1 (de maior precipitação), quando consideramos o descritor 90% da resistência elétrica (Tabela 3), pode-se observar que 90% das RE ficaram abaixo do valor de 42,7 kOhms, enquanto para o período 2 (de menor precipitação) ficaram abaixo de 70,3 kOhms, sendo 64,6% maior para o período 2. Percebe-se também que os valores de resistência elétrica média e mediana foram menores no período 1, assim como a amplitude de valores de resistência elétrica (diferença entre as RE máximas e mínimas) foi distinta entre os dois períodos. O período 1 apresentou amplitude de 35,7 kOhms, enquanto o período 2 apresentou amplitude de 84,7 kOhms. Isto descreve o estado de funcionamento do mesmo sistema edáfico quando consideramos as condições de pluviosidade nos dois períodos. Aparentemente, a resposta dos sensores nos dois períodos está associada à dinâmica da pluviosidade de modo mais evidente, o que está de acordo com o descrito por Samouëlian et al. (2005).

Ainda em relação a estes dois períodos, é proposta a análise dos resultados considerando o seu agrupamento nas mesmas transectas já apresentadas nas Figuras 2 e 3. Os histogramas dos valores de resistência elétrica observada nas 4 transectas e nos dois períodos são apresentados na Figura 9.



**Figura 9.** Histogramas da frequência relativa da resistência elétrica do solo monitorada em todos os sensores no período 1, entre 21/05/2020 e 12/06/2020 (A – Transectas 1 e 3, B – Transectas 2 e 4) e no período 2, entre 05/11/2020 e 27/11/2020 (C – Transectas 1 e 3, D – Transectas 2 e 4).

Os histogramas de todas as transectas tiveram comportamento similar dentro de cada período, seguindo os mesmos padrões, ou seja, distribuição não normal e assimétrica à esquerda para o período 1 e não normal e sem pico definido para o período 2, como apresentados na Figura 8.

As medidas descritivas dos histogramas de valores de resistência elétrica, relativos à Figura 9, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Medidas descritivas de resistência elétrica (RE, kOhms) registrados pela totalidade dos sensores agrupados por períodos de tempo, relativas aos dados apresentados na Figura 9.

Descritores	Período 1				Período 2			
	Trans. 1	Trans. 2	Trans. 3	Trans. 4	Trans. 1	Trans. 2	Trans. 3	Trans. 4
	RE mínima	27,6	26,2	24,4	32,0	23,8	35,3	29,1
RE máxima	56,7	49,6	47,4	60,1	81,0	85,3	103,7	80,5
RE média	42,0	37,9	35,7	45,9	52,1	57,8	60,8	48,7
RE mais frequente	34,1	33,2	30,4	38,8	33,3	65,6	35,4	22,8
RE mediana	41,9	37,9	35,7	45,9	52,1	57,6	60,1	48,1
50% das RE	34,8	33,6	31,4	40,6	47,7	54,7	52,0	30,0
90% das RE	40,1	37,5	37,6	48,2	70,5	68,8	77,5	56,8

Ao considerar as medidas descritivas relativas aos histogramas da Figura 9 que são apresentados na Tabela 4, observa-se que, em média, a amplitude de oscilação dos valores de resistências elétricas foi de 25,9 kOhms e de 61,6 kOhms para as quatro transectas no período 1 e 2, respectivamente. As RE média, mediana e 90% das RE também foram sempre menores no período 1.

Ao se analisar apenas o período 1, a transecta 4 foi a que apresentou os maiores valores de resistência elétrica para todos os descritores elencados na Tabela 4. No período 2, a transecta 4 registrou os menores valores de resistência elétrica para todos os descritores elencados na Tabela 4, comportamento oposto ao do período 1.

A partir dos histogramas da Figura 9 e das medidas descritivas da Tabela 4, construiu-se um diagrama de ordenação das quatro transectas nos dois períodos em função das respectivas medidas descritivas, que é apresentado na Figura 10.

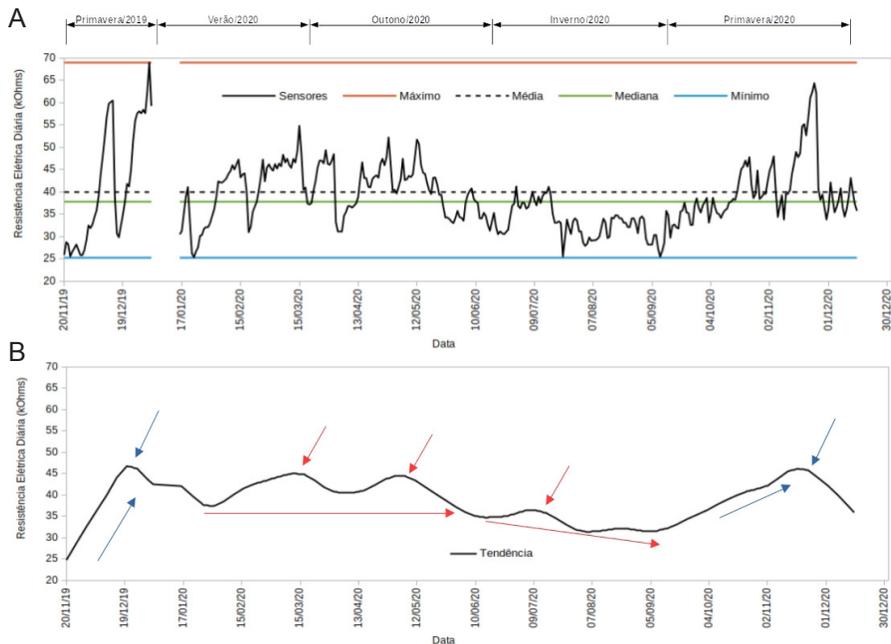


**Figura 10.** Diagrama de ordenação de grupos de sensores em 4 transectas nos dois períodos escolhidos (período 1, de 21/05/2020 a 12/06/2020, e período 2, de 05/11/2020 a 27/11/2020) em função das medidas descritivas dos registros apresentados na Tabela 4. (P1T1 = período 1, transecta 1; P1T2 = período 1, transecta 2; P1T3 = período 1, transecta 3; P1T4 = período 1, transecta 4; P2T1 = período 2, transecta 1; P2T2 = período 2, transecta 2; P2T3 = período 2, transecta 3; P2T4 = período 2, transecta 4).

Na Figura 10, percebe-se que todos os grupos de sensores nas quatro transectas ficaram à direita (nos quadrantes 1 e 4) no período 1, e à esquerda (nos quadrantes 2 e 3) na ordenação no período 2, confirmando as diferenças salientadas por histogramas apresentados nas Figuras 8 e 9 e na interpretação da Tabela 4. As medidas descritivas da Tabela 4 se mostram eficientes para identificar tendências de padrões de resistência à condutividade elétrica no sistema proposto, quando submetidos a análise exploratória.

Esses resultados reforçam que os sistemas edáficos representados pelas transectas tiveram funcionamento distinto entre os dois períodos avaliados. De modo complementar, para o período 1 (com maior precipitação) as transectas apresentaram tendência de maior semelhança no estado de funcionamento entre si, enquanto que para o período 2 (com menor precipitação) as mesmas transectas mostraram tendência de menor semelhança entre si.

A dinâmica da resistência à condutividade elétrica média diária de 24 sensores considerando 390 dias de monitoramento é representada na Figura 11.

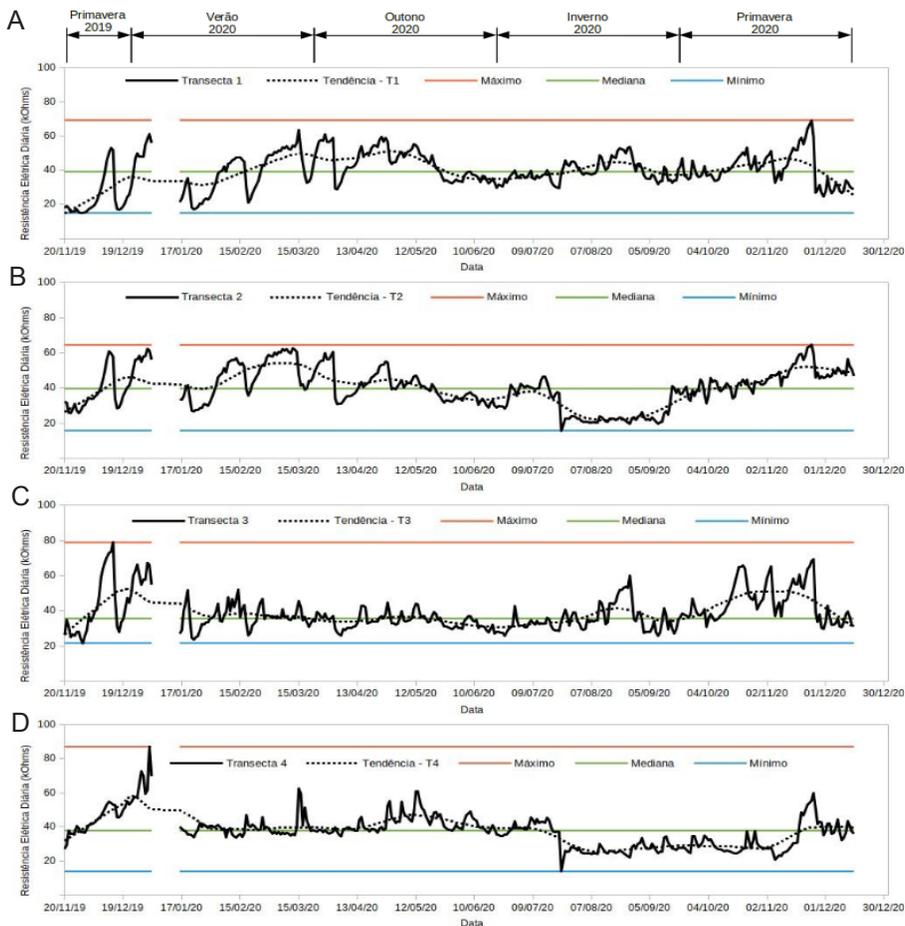


**Figura 11.** Série temporal dos registros médios diários de resistência elétrica (A) e tendência diária estimada pelo método STL (B).

Na dinâmica da resistência elétrica dos gráficos da Figura 11, é possível visualizar o comportamento geral do sistema de monitoramento. Inclusive observa-se que o máximo valor de resistência elétrica foi de aproximadamente 68,5 kOhms, a média foi de 39,5 kOhms, a mediana foi 38,4 kOhms e o valor mínimo foi de 25,3 kOhms (Figura 11A). O longo período de monitoramento permitiu acompanhar o comportamento da resistência elétrica por cinco sucessivas estações do ano, da primavera de 2019 à primavera de 2020. Destacam-se, na Figura 11A, três picos de resistência elétrica acima de 60 kOhms, dois ocorridos na primavera de 2019 e um na primavera de 2020. Ao mesmo tempo, cinco picos de resistência elétrica próximo ao valor mínimo chamam a atenção, sendo dois na primavera de 2019, um no verão de 2020 e dois no inverno de 2020.

Uma análise dos dados da Figura 11A, considerando-os como série temporal e extraindo-se a tendência ao longo do período estudado (Godolphin; Triantafyllopoulos, 2006; Theodosiou, 2011), é apresentada na Figura 11B. A análise de tendência demonstra três padrões: dois identificados nas primaveras de 2019 e 2020 (setas em destaque azul na Figura 11B) e um intermediário com início no verão, que se desenvolve no outono e termina no inverno de 2020 (setas em destaque vermelho). Nas primaveras foram registrados os maiores valores de resistência elétrica. Entre o verão e o outono de 2020, observou-se a manutenção de valores de resistência elétrica (próximos aos valores máximos de primavera), seguido de um decréscimo gradual, sendo no final do inverno os registros mais baixos. Estes padrões observados acompanham as características meteorológicas da região, tanto de precipitação e temperatura do ar pela Estação Meteorológica da Embrapa Pecuária Sul (Bagé/RS), quanto de evapotranspiração potencial média mensal (Silveira; Trentin, 2019) e de balanço hídrico para Bagé (Trentin, 2013).

A Figura 12 traz as séries temporais que representam as dinâmicas diárias de resistência à condutividade elétrica de sensores agrupados em quatro transectas.

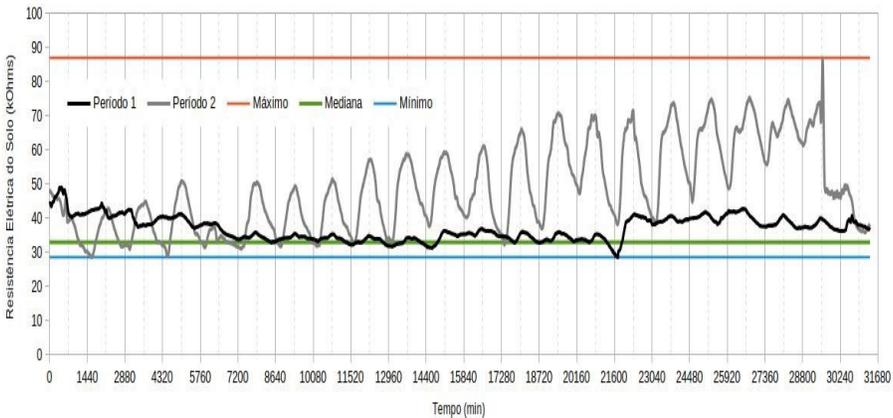


**Figura 12.** Série temporal dos registros médios diários de resistência elétrica e tendência diária estimada pelo método STL para cada grupo de sensores em transectas para todo o período estudado. (A) Transecta 1; (B) Transecta 2; (C) Transecta 3; e (D) Transecta 4.

Na Figura 12, os agrupamentos dos sensores permitem perceber que as leituras de resistência elétrica (média diária) do sistema edáfico oscilaram ao longo dos 390 dias de monitoramento, tanto nas transectas, quanto entre as transectas. Ainda, a partir das linhas de tendência e dos valores absolutos, observam-se padrões de resistência à condutividade elétrica ao longo do período do estudo. Dois picos de resistência elétrica nos períodos de primavera de 2019 e 2020 são comuns a todos os sensores quando agrupados em transectas. Em relação aos períodos de verão e outono (2020), as dinâmicas dos grupos de sensores das transectas 1 e 2 são similares. Os valores mínimos de resistência próximas à mediana e os valores máximos próximos ao valor máximo observado para cada grupo. Por outro lado, as transectas 3 e 4 podem ser caracterizadas por valores de resistência à condutividade elétrica próximo à mediana. Ao se analisar a dinâmica no período de inverno, temos que as transectas 2 e 4 são similares entre si, com valores mais próximos ao mínimo de cada grupo, enquanto as transectas 1 e 3, também similares entre si, mas com valores próximos à mediana.

Os dados apresentados de série temporal da resistência elétrica do sistema edáfico nas Figura 11 e 12 entregam o estado de funcionamento desse sistema natural em períodos de tempo maior que uma semana. Contudo, é uma característica do sistema integrado de monitoramento proposto a coleta de valores em intervalo de tempo de minuto a minuto, o que permite a inferência do estado de funcionamento do sistema edáfico em períodos de tempo menores que um dia.

A Figura 13 apresenta a tendência decomposta da série temporal (Godolphin; Triantafyllopoulos, 2006; Theodosiou, 2011) de dados médios de resistência elétrica obtidas de 24 sensores em dois períodos de tempo, como descrito na Figura 6.

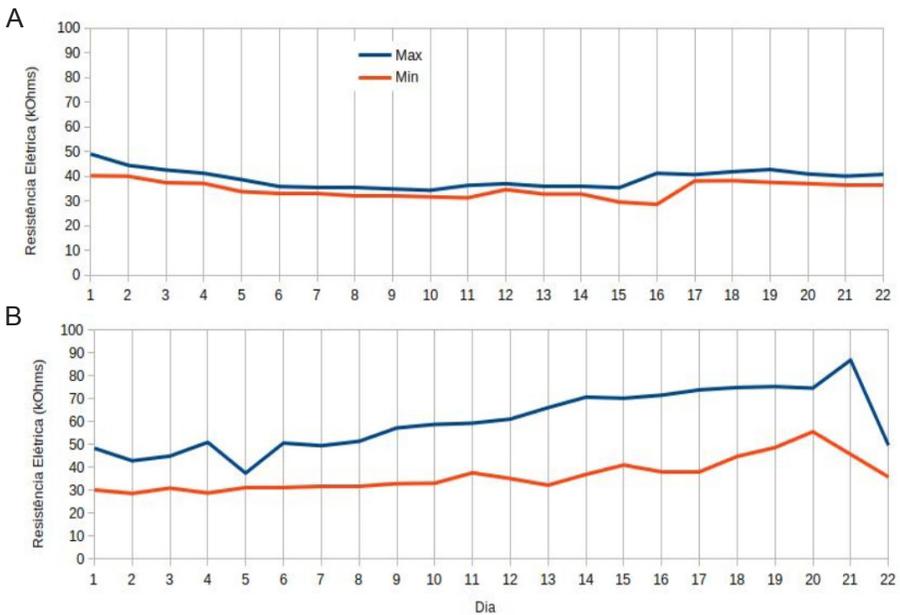


**Figura 13.** Série temporal dos registros médios (média de 24 sensores) por minuto de resistência elétrica do solo monitorada em todos os sensores e agrupada em dois períodos: Período 1, entre 21/05/2020 e 12/06/2020 e Período 2, entre 05/11/2020 e 27/11/2020. (obs.: linhas inteiras paralelas ao eixo y indicam a hora 0:00 e as linhas tracejadas paralelas ao eixo y indicam a hora 12:00)

A resistência elétrica monitorada pelo conjunto de sensores do sistema proposto apresentou comportamento distinto entre os dois períodos (Figura 13). Na manhã do primeiro dia de monitoramento de ambos os períodos (entre 0 e 720 minutos, dos dias 21/05/2020 e 05/11/2020, respectivamente), os valores de resistência elétrica foram similares, aproximadamente 45 e 48 kOhms para os períodos 1 e 2, respectivamente. Contudo, em relação ao primeiro período, observa-se que os valores registrados de resistência elétrica diminuíram gradativamente até o 14º dia (equivalente a 21600 minutos), quando passam por uma pequena elevação e voltam a diminuir gradativamente até a tarde do 20º dia. Ao mesmo tempo, os valores de resistência elétrica permanecem mais próximos à mediana e ao mínimo observado para os dois períodos. Já em relação ao segundo período, chama atenção as maiores oscilações dos valores de resistência elétrica ao longo dos dias, bem como a tendência de aumento dos valores, até atingir o máximo de leitura no final da manhã do 20º dia (equivalente ao minuto 29520). Após esse momento, a resistência elétrica do sistema edáfico se reduz a valores próximos à mediana. Este comportamento dos valores de resistência elétrica no período 1 é condizente com o apresentado no histograma da Figura 8, bem como com o estado de funcionamento do sistema edáfico nas condições meteorológicas apresentadas nas Figuras 6 e 7.

Novamente, estes resultados reforçam que a resposta dos sensores está associada à dinâmica da pluviosidade e da água na solução do solo, o que está de acordo com o descrito por Samouëlian et al. (2005). Os sensores registraram oscilações da resistência à condutividade elétrica que expresam efeitos de alterações cíclicas diárias que podem ser identificadas pela amplitude da diferença entre os valores máximos e mínimos diários e serem caracterizados pela frequência que ocorrem.

A amplitude se expressa pelos registros de picos de máxima e mínima de resistência elétrica ao longo de períodos de observação, como apresentado na Figura 14. A frequência é definida pela distância entre os picos. Este comportamento poderia ser considerado como um indicador na comparação entre períodos de monitoramento.

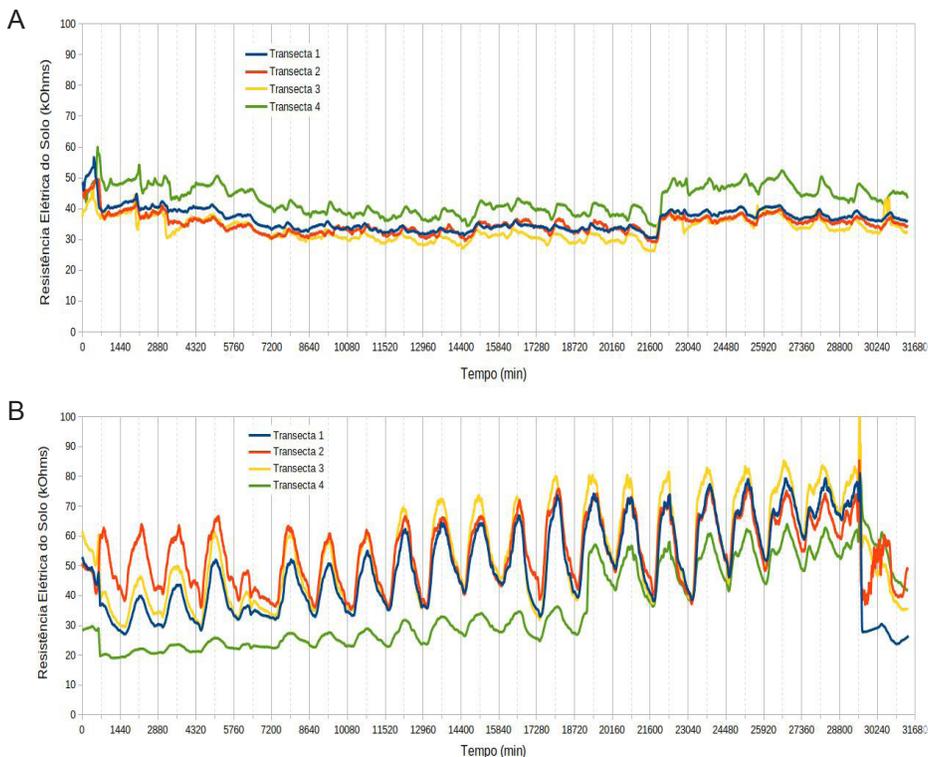


**Figura 14.** Dinâmica dos valores diários de máximos e mínimos de resistência à condutividade elétrica dos dados apresentados na Figura 13. (A - Período 1; B - Período 2).

A análise da dinâmica de valores diários mínimos e máximos de resistência elétrica do sistema edáfico, como apresentado na Figura 14, possibilita uma inferência precisa do funcionamento do sistema edáfico em dois períodos distintos do monitoramento. A distância entre os valores máximos e mínimos é um indicador importante do funcionamento do sistema edáfico para comparação entre os dois períodos.

A amplitude diária dos valores de resistência elétrica oscilou de modo diferente nos dois períodos (Figura 14). No período 1, que representa o estado de funcionamento do sistema edáfico em uma época de excedente pluviométrico (Figura 6A), as amplitudes diárias tiveram menor magnitude de oscilação de resposta ao longo do tempo (entre 3 e 5 kOhms, aproximadamente). Ocorreu apenas um pico no 16º dia, que representa a maior variação da resistência elétrica observada na mesma data na Figura 13 (entre os minutos 21600 e 23040). No período 2, que representa o estado de funcionamento do sistema edáfico em uma época de secamento do solo entre dois eventos de precipitação (Figura 6B), as amplitudes diárias tiveram maior magnitude de oscilação de resposta ao longo do tempo. Ocorreu um curto período de estabilidade entre os 1º e 3º dias, seguido do aumento da amplitude no 4º dia e redução no 5º dia. Entre o 6º e o 17º dia, as amplitudes diárias vão aumentando, quando atingem seu maior valor (que representa a maior oscilação entre os minutos 23040 e 24480 na Figura 13). Entre os dias 17 e 20, a amplitude volta a decrescer. No 21º dia ocorre um pico de amplitude, que se refere oscilação entre a resistência elétrica máxima seguida de rápida redução (equivalente aos minutos 29520 e 30240 na Figura 13). Estes resultados indicam que a amplitude diária dos valores de resistência elétrica pode ser considerada como mais um parâmetro descritor e de comparação do estado de funcionamento do sistema edáfico a ser monitorado.

A Figura 15 apresenta a tendência decomposta da série temporal (Godolphin; Triantafyllopoulos, 2006; Theodosiou, 2011) de dados médios de resistência elétrica dos sensores agrupados em quatro transectas nos dois intervalos de tempo, como descrito na Figura 6.



**Figura 15.** Séries temporais da resistência elétrica do solo (média dos sensores em cada transecta) observada nos períodos de eventos climáticas escolhidos: A – Período 1, entre 21/05/2020 e 21/06/2020 e B – Período 2, entre 05/11/2020 e 27/11/2020. (obs.: linhas inteiras paralelas ao eixo y indicam a hora 0:00 e as linhas tracejadas paralelas ao eixo y indicam a hora 12:00).

Como se trata do mesmo sistema natural em dois momentos distintos, de maior e menor pluviosidades, bem como de menor e maior temperatura, respectivamente, pode-se dizer que o sistema de sensores foi eficiente na caracterização do comportamento desses momentos.

Em condições de maior teor de água no sistema é esperado que a resistência à condutividade elétrica seja menor. Por outro lado, ao ocorrer a diminuição do teor de água no sistema, é esperado que a resistência à condutividade elétrica aumente. A Figura 15A descreve o registro dos grupos de sensores relativos ao período caracterizado por frequentes precipitações e de temperaturas médias mais amenas, como apresentado na Figura 6A. A Figura 15B, por sua vez, caracteriza o registro dos grupos de sensores relativos ao período caracterizado por precipitações pouco frequentes e de temperaturas médias mais elevadas (Figura 6B).

Como se pode observar nas séries temporais apresentadas na Figura 15, os sensores registraram comportamento com tendência distinta quando comparados os dois períodos. Percebe-se que as amplitudes de valores de resistência elétrica do solo ao longo do tempo definem tal tendência de comportamento.

Nas dinâmicas registradas de resistência elétrica pelo conjunto de sensores e expressos nos gráficos da Figura 15, observa-se que a resposta destes sensores pode ser descrita por meio da magnitude e da frequência ao longo de períodos (como também proposto na análise dos dados apresentados na Figura 14).

A estabilidade dos sistemas descritos pelo conjunto de sensores é definida pela amplitude e frequência dos picos de resistência elétrica. Assim, se pode dizer que o sistema edáfico monitorado no primeiro período (Figura 13A) se encontra em condições de maior estabilidade, quando comparado com o outro período (Figura 13B).

Este comportamento demonstra a potencialidade dos sensores no monitoramento do estado de funcionamento de sistemas edáficos. Seja no diagnóstico do estado de funcionamento instantâneo, seja no desenho de estratégias para prevenção ou diminuição de riscos para a produção.

## Conclusões

---

Com base nos resultados apresentados e discutidos é possível concluir:

a) O maior número de sensores, bem como sua sensibilidade e elevada frequência de registros nos permite trabalhar processos ou padrões em diferentes escalas espaciais e temporais, com distintos agrupamentos de sensores considerando sua localização e períodos de tempo.

b) A amostragem preferencial sistemática na utilização de sensores demonstra ser uma estratégia eficiente para o monitoramento do sistema edáfico.

c) A análise da dinâmica temporal em diferentes escalas (anual, estações do ano e duas condições microclimáticas distintas) permitiu identificar a amplitude total de resistência elétrica ao qual o sistema edáfico foi exposto, bem como seu estado de funcionamento em cada período.

d) A estratégia de análise e interpretação de dados de registro de sensores resistivos aplicados no monitoramento de sistemas edáficos permitiu a ampla caracterização do estado de funcionamento dos sistemas edáficos.

## Considerações finais

---

O acompanhamento do funcionamento do sistema integrado de monitoramento, associado à metodologia proposta de processamento dos dados permitiu considerar também:

a) O sistema integrado de monitoramento proposto demonstra ter potencial de ser utilizado no monitoramento de sistemas edáficos, independentemente da cobertura e/ou uso da terra.

b) Faz-se necessário aprofundar o estudo do comportamento dos sensores ao longo de distintos intervalos de tempo, tanto menores quanto maiores, na busca de padrões de comportamento, como complemento ao processo de tomada de decisão na gestão.

c) Há necessidade de monitorar também a solução do solo e da água da chuva, fatores fundamentais para determinar o grau de associação com o funcionamento do sistema edáfico, bem como parâmetros microclimáticos e do estado da vegetação.

d) Há possibilidade de automação do processamento dos dados coletados para a entrega mais refinada ao usuário final, possibilitando o fornecimento de informações qualificadas em tempo real do estado de funcionamento do sistema edáfico.

## Referências

---

- ALTIERI, M. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 74, n. 1-3, p. 19-31, June 1999.
- CARMO, D. L. do; SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1762-1772, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001000008>.
- CLEVELAND, R. B.; CLEVELAND, W. S.; MCRAE, J. E.; TERPENNING, I. J. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. **Journal of Official Statistics**, v. 6, n. 1, p. 3-33, 1990.
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; GROOT, R. de; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V. O.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTONKK, P. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253-260, 15 May 1997.
- DIAS-FILHO, M. B.; FERREIRA, J. N. **O pastejo e a biodiversidade da pastagem**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009. 46 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 355).
- ECOSYSTEMS and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005. 155 p. (The Millennium Ecosystem Assessment series).
- GODOLPHIN, E. J.; TRIANTAFYLLOPOULOS, K. Decomposition of time series models in state-space form. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 50, n. 9, p. 2232-2246, May 2006.
- HAVSTAD, K. M.; HERRICK, J. E. Long-term ecological monitoring. **Arid Land Research and Management**, v. 17, n. 4, p. 389-400, 2003.
- HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 800 p.
- JOHNSON, C. K.; ESKRIDGE, K. M.; CORWIN, D. L. Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 181-202, Mar. 2005.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: UPF Ed., 2014. 263 p.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção.

**Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 420-426, ago. 2005. RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of American Journal**, v. 53, n. 2, p. 433-439, Mar./Apr. 1989.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173-193, Sept. 2005.

SILVEIRA, M. C. T. da; TRENTIN, G. **Manejo para pastagens irrigadas**: fundamentos e recomendações práticas. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2019. 44 p. (Embrapa Pecuária Sul. Documentos, 163).

PILLAR, V. DE P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (ed.). **Campos sulinos**: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. 403 p.

PILLAR, V. DE P. **Multiv**: multivariate exploratory analysis, randomization testing and bootstrap resampling. Porto Alegre: UFRGS, 2004. 41 p.

THEODOSIOU, M. Forecasting monthly and quarterly time series using STL decomposition. **International Journal of Forecasting**, v. 27, n. 4, p. 1178-1195, Oct./Dec. 2011.

TRENTIN, G. **Manejo de irrigação para pastagens**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2013. 1 folder.

TRINDADE, J. P. P.; BORBA, M. F. S.; VOLK, L. B. da S. **Pastejo e a estabilidade de pastagens naturais**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2011. 17 p. (Embrapa Pecuária Sul. Documentos, 125).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como um sistema**. 1. ed. Curitiba: Ed. dos autores, 2011. 104 p.

VOLK, L. B. da S.; TRINDADE, J. P. P. **Princípios técnicos de manejo de sistemas pecuários para maior disponibilidade de água no solo**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2020. 26 p. (Embrapa Pecuária Sul. Comunicado técnico, 104).

**Embrapa**

---

**Pecuária Sul**



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO

