

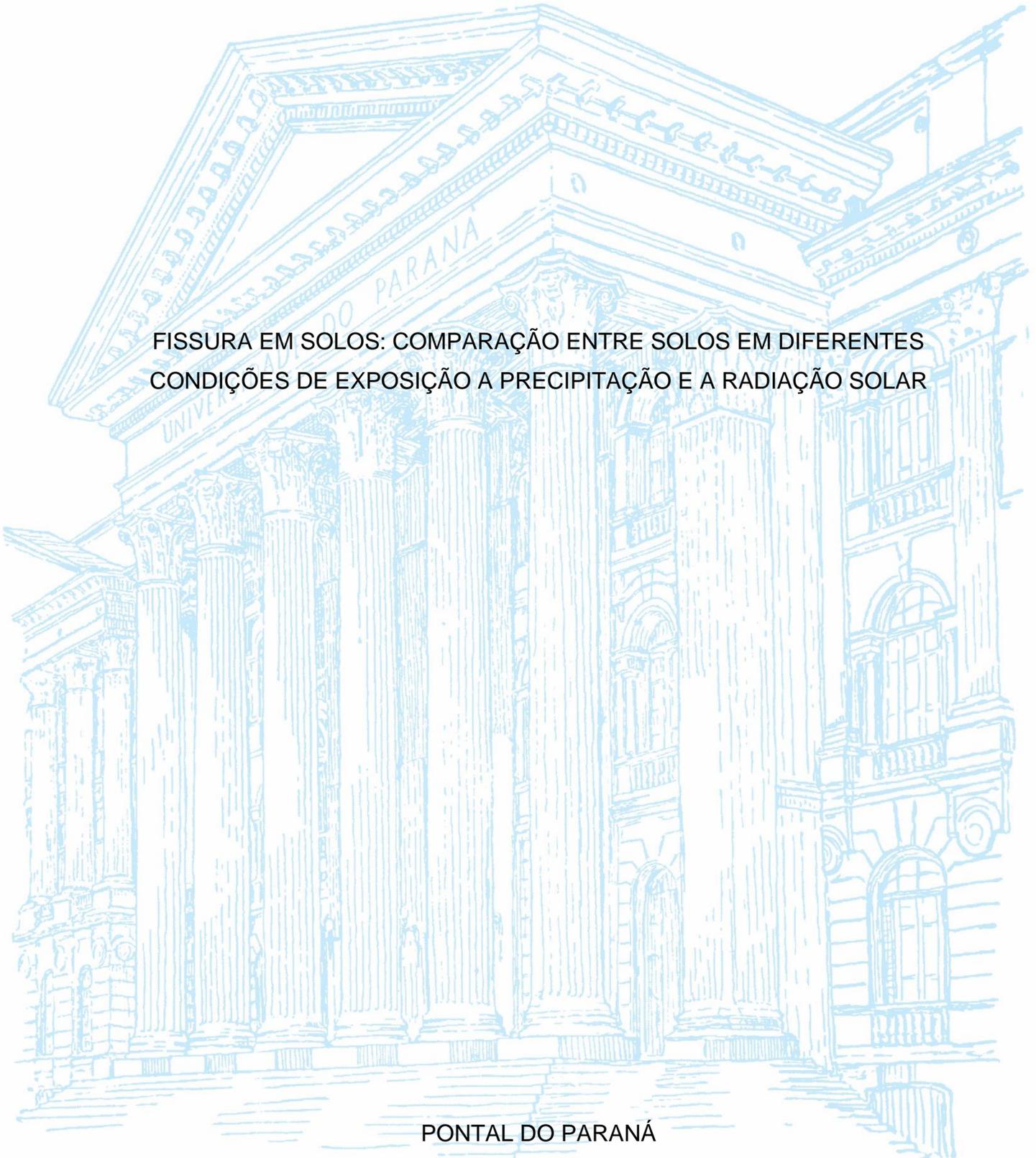
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAROLINE SOECKI

FISSURA EM SOLOS: COMPARAÇÃO ENTRE SOLOS EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO A PRECIPITAÇÃO E A RADIAÇÃO SOLAR

PONTAL DO PARANÁ

2021



KAROLINE SOECKI

FISSURA EM SOLOS: COMPARAÇÃO ENTRE SOLOS EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO A PRECIPITAÇÃO E A RADIAÇÃO SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil, Campus Avançado de Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, para a disciplina TCC II.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Roberta Brondani Minussi

PONTAL DO PARANÁ

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Começo meus agradecimentos a minha família, que sempre foi base, apoio, carinho e ajuda durante todos os anos de graduação.

Agradeço meus amigos antigos e os que encontrei durante essa caminhada.

A minha orientadora Roberta Brondani Minussi, pela paciência e pelo aprendizado.

A doutoranda Elisangela do Prado Oliveira que enquanto foi professora despertou minha admiração pela área da geotécnica. Agradeço também pela oportunidade de aprofundamento na área e de poder utilizar os resultados obtidos neste trabalho.

A todos os outros envolvidos indiretamente que deram vida a este trabalho.

Por último agradeço a Deus.

## RESUMO

A perda de água do solo é um fenômeno natural, mas o ressecamento excessivo sofrido desde o início da estiagem vivida no ano de 2020, trouxe uma preocupação a mais com possíveis mudanças de comportamento desse material. A evaporação de água gera tensões na superfície que, ao ultrapassarem a resistência a tração do solo, provocam suas fissuras. O objetivo deste trabalho é analisar as variáveis que podem favorecer o processo de fissuração. Sendo assim, foram coletados cinco tipos diferentes de solos na região de Irati-PR, moldando-se duas amostras para cada tipo. As amostras foram alocadas de forma a deixar um grupo exposto às condições climáticas, dando ênfase para a precipitação e a radiação solar, e outro grupo foi deixado sem acesso a estes fatores. Durante o período de análise, foram tiradas fotos para o processamento de dados. Com o auxílio do programa *ImageJ*, obtiveram-se as informações necessárias para o *Crack Intensity Factor*, CIF. Os resultados apontam para um CIF mais elevado para os solos com maiores valores de partículas finas em sua composição e, portanto, com maiores índices de plasticidade. Os solos expostos às variantes climáticas obtiveram o mesmo comportamento, onde o CIF caminhou de forma semelhante aos valores de radiação solar obtidos diariamente. Para os solos não expostos, houve uma evolução muito pequena nas fissuras, mostrando assim a dependência das condições climáticas no processo de fissuração dos solos.

Palavras-chave: Solos. Fissuras. CIF. Radiação solar.

## ABSTRACT

Water loss of the soil is a natural phenomenon, but the excessive dryness endured since the beginning of the drought in 2020 has brought extra concern with possible behavioral changes of this material. Evaporation of water generates stress in the soil's surface which, after exceeding the resistance to tensile stress of the soil, generates cracks. The objective of this work is to analyze the variables which may contribute to the process of soil cracking. For this purpose, five different types of soil were collected and for each type, two samples were molded. The samples were then placed in such a way to leave one group exposed to weather conditions, with emphasis on rainfall and solar radiation, while the other group was not exposed to these variables. During the experiment, peridical photos were taken for data processing. With the help of *ImageJ* software, data for Crack Intensity Factor, CIF, was obtained. The results point towards a higher CIF for soils with higher values of fine particles in its composition and with larger indices of plasticity. Soils samples exposed to climatic variables attained the same behavior with CIF developing in a similar way to the solar radiation values taken day by day. For samples placed away from the sun and rain exposures, there was little evolution in cracks, showing weather condition dependency in the process of soil cracking.

Keywords: Soil. Cracking. CIF. Solar radiation.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1	OBJETIVOS .....	8
1.1.1	Objetivo geral .....	8
1.1.2	Objetivos específicos.....	8
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1	SOLOS NÃO SATURADOS .....	10
2.1.1	Fases de um solo .....	10
2.1.2	Solos finos.....	11
2.1.3	Potenciais de água no solo .....	13
2.1.4	Sucção .....	14
2.2	FISSURAS EM SOLOS.....	17
2.2.1	Formação de fissuras por ressecamento.....	17
2.2.2	Fatores condicionantes para o surgimento de fissuras.....	19
2.2.3	Radiação solar .....	21
2.3	CIF.....	22
2.4	PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
3.1	LOCAL DE ESTUDO.....	24
3.1.1	Estação do INMET .....	25
3.2	COLETA DOS SOLOS .....	26
3.2.1	Localização de cada solo .....	26
3.2.2	Situação em que os solos se encontravam .....	27
3.3	PREPARO DAS AMOSTRAS .....	30
3.3.1	Materiais utilizados.....	31
3.3.2	Soquete para compactação.....	31
3.3.3	Preparo das amostras .....	32
3.3.4	Caracterização dos solos .....	38
3.4	ANÁLISE DE FISSURAS .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
4.1	SOLOS EXPOSTOS .....	41
4.1.1	Solo A.....	42
4.1.1.1	Ciclo inicial – Ciclo 1.....	42

4.1.1.2	Ciclo intermediário – Ciclo 6 .....	43
4.1.1.3	Ciclo final – Ciclo 8 .....	45
4.1.2	Solo B.....	47
4.1.2.1	Ciclo inicial – Ciclo 1 .....	47
4.1.2.2	Ciclo intermediário – Ciclo 4 .....	48
4.1.2.3	Ciclo final – Ciclo 8 .....	50
4.1.3	Solo C.....	51
4.1.3.1	Ciclo inicial – Ciclo 1 .....	51
4.1.3.2	Ciclo intermediário – Ciclo 6 .....	53
4.1.3.3	Ciclo final – Ciclo 8 .....	54
4.1.4	Solo D.....	56
4.1.4.1	Ciclo inicial – Ciclo 1 .....	56
4.1.4.2	Ciclo intermediário – Ciclo 5.....	57
4.1.4.3	Ciclo final – Ciclo 7 .....	59
4.1.5.1	Ciclo inicial – Ciclo 1 .....	60
4.1.5.2	Ciclo intermediário – Ciclo 6 .....	62
4.1.5.3	Ciclo final – Ciclo 8 .....	63
4.2	<b>SOLOS INTERNOS.....</b>	<b>65</b>
4.2.1	Solo A.....	65
4.2.2	Solo B.....	66
4.2.3	Solo C.....	68
4.2.4	Solo D.....	70
4.2.5	Solo E.....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A - SOLO A, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO.....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE B - SOLO B, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO.....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE C - SOLO C, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE D - SOLO D, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO.....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE E - SOLO E, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO.....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE F - PROCESSAMENTO DAS IMAGENS COM <i>IMAGE J</i>.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A formação das fissuras é um processo natural, que ocorre em grande parte pelo ressecamento dos solos. A alternância de períodos úmidos e secos faz com que as fissuras apareçam, aumentem suas dimensões e depois com as chuvas desapareçam. Um longo intervalo sem chuvas causa o surgimento de fissuras maiores.

O aumento da profundidade das fissuras verticais é prejudicial pois expõe os solos profundos a correntes de ar que modificam a resistência aos esforços mecânicos e aumentam a capacidade de infiltração do solo, favorecendo a retração ou expansão, afetando assim o desempenho de elementos estruturais de casas, edifícios verticais, reservatórios, pavimentos e taludes de corte.

Em aterros sanitários os solos são utilizados na camada superior para controlar a infiltração de águas pluviais e impedir a saída de gases e também na base como impermeabilizante para atenuar os efeitos químicos do lixiviado no lençol freático. O surgimento de fissuras compromete a condutividade hidráulica, não garantindo a estanqueidade, levando ao fluxo de água pluvial na camada superior e a percolação de materiais nocivos em águas subterrâneas através da camada inferior.

Em decorrências dos graves impactos que as fissuras podem causar faz-se necessária uma melhor compreensão da influência de alguns parâmetros ambientais e propriedades do solo para o processo de formação e propagação das fissuras.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a formação e propagação de fissuras em diferentes solos expostos ao ar livre e compará-los com solos cobertos, sem a interação com radiação solar e chuvas através do processamento de imagens.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- acompanhamento da formação e evolução das fissuras e seu comportamento perante o clima inserido, e
- quantificação das fissuras através de pós processamento de imagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

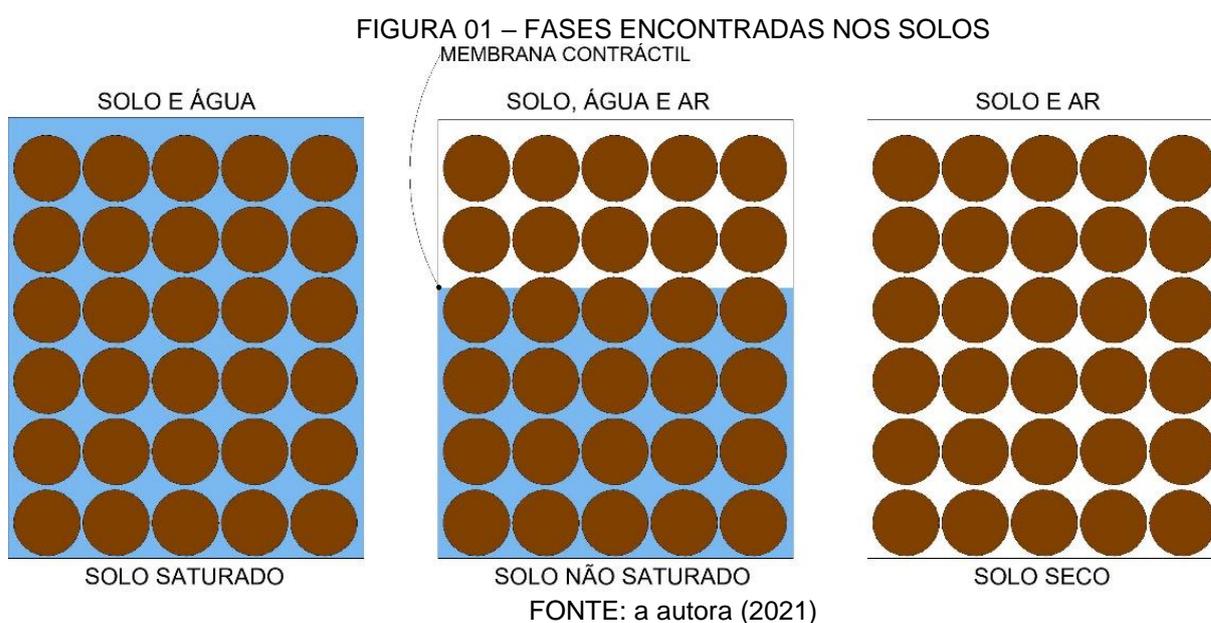
### 2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

A formação dos solos começa pela alteração de temperaturas na atmosfera, que ocasiona trincas nas rochas. Com a percolação de água pelas trincas, os minerais são desagregados e sofrem mudanças químicas. O conjunto destes processos é visto como intemperismo que segundo Camapum et al. (2015), é regulado pelas condições climáticas e relevos, sendo então um processo geológico natural e variável conforme o local.

Um solo seco é constituído somente de ar e partículas sólidas, sem a presença da água. Um solo é considerado saturado quando há somente a presença das partículas sólidas e água, não havendo vazios preenchidos com ar.

#### 2.1.1 Fases de um solo

Os solos normalmente apresentam-se como uma mistura das fases sólida, fase líquida e fase gasosa. Uma quarta fase pode ser considerada nos casos dos solos não saturados, a membrana contráctil. A FIGURA 01 representa as quatro possíveis fases encontradas nos solos.



A fase líquida é composta por água e sais minerais. Segundo Bonder (2008), a água dentro dos poros pode ser de três tipos: água gravitacional, água adsorvida e água capilar.

A água gravitacional é aquela que consegue transitar através da ação da gravidade pelos poros dos solos. A água adsorvida, característica de solos finos, é a água que adere ao redor do sólido, em decorrência da presença de cargas negativas nesta superfície. Sendo assim, é a porção da água que não possui livre circulação. Já a água capilar permanece e se movimenta no solo através das forças de capilaridade presentes na interface solo – água. Este fenômeno só ocorre quando o solo não está saturado.

A fase gasosa é formada pelo ar livre e pela água no estado de vapor, ocupando os poros que não possuem água. Sendo assim, a fase gasosa está presente nos solos secos e nos não saturados.

A fase sólida é constituída pelas partículas de minerais, sendo esta a fase mais heterogênea, tendo diferentes tamanhos, formas, composições mineralógicas, texturas e densidades. A forma e tamanho das partículas dos minerais são as características que mais influenciam o comportamento dos solos. Já a membrana contráctil representa a interface água – ar, sendo composta por propriedades diferentes da água e do ar que a rodeiam. Apesar de ser uma fase distinta, seu volume é desprezado pelo baixo valor e sua massa é incorporada na massa da água.

### 2.1.2 Solos finos

O tamanho dos solos é visto a partir do diâmetro dos grãos das partículas, recebendo uma designação para cada fração correspondente. Existem divergências em relação aos tamanhos limites para a classificação das partículas entre as instituições que normatizam ensaios. Este trabalho terá como referência a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), tendo valores estipulados pela NBR 7181-2016, como mostra a TABELA 01:

TABELA 01: CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO DIÂMETRO DOS GRÃOS ABNT

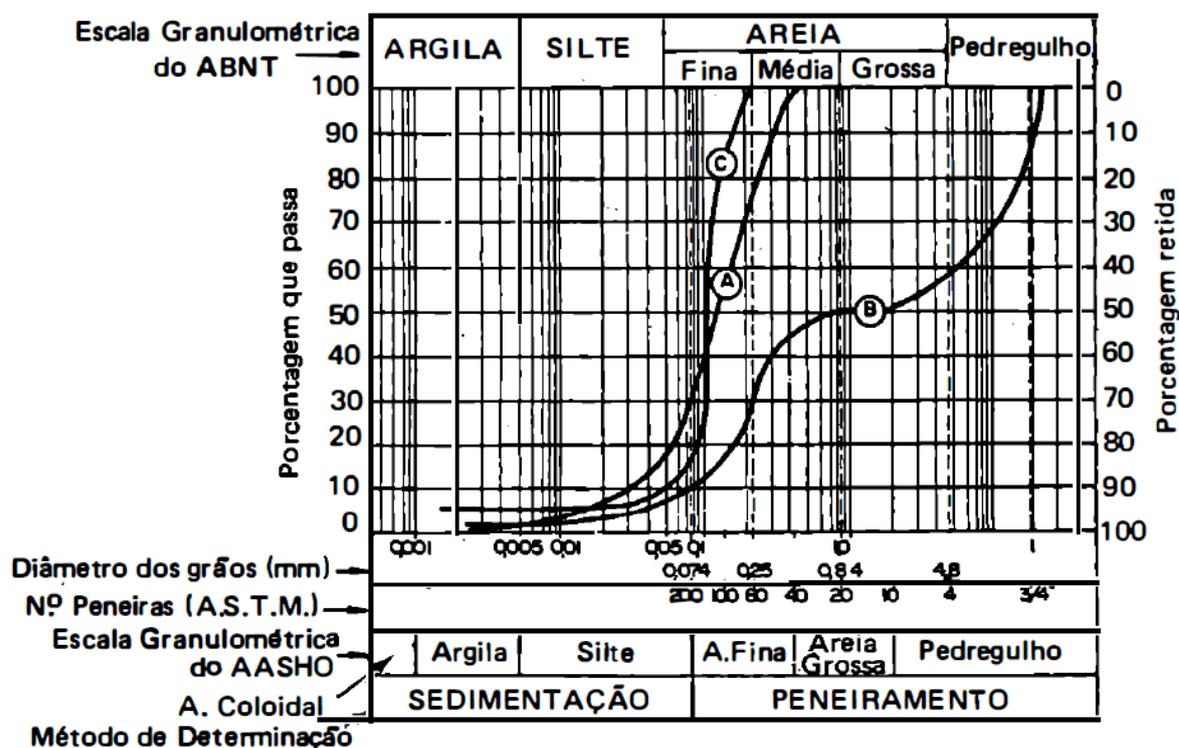
Classificação	Diâmetro dos grãos (mm)
Argila	$d < 0,002$
Silte	$0,002 < d > 0,06$
Areia fina	$0,06 < d > 0,2$
Areia média	$0,2 < d > 0,6$
Areia grossa	$0,6 < d > 2$
Pedregulho	$2 < d > 60$
Pedra	$60 < d > 200$
Matacão	$d > 200$

FONTE: ABNT NBR 7181 (2016)

A curva granulométrica é a ferramenta mais comum para apresentar dados referentes aos ensaios granulométricos regidos pela ABNT/NBR 7181-2016, que representam a variação do tamanho das partículas de um mesmo solo.

A FIGURA 2 é utilizada por Caputo (1988) para exemplificar o funcionamento do gráfico da curva granulométrica. Nela é possível também comparar a escala granulométrica utilizada pela ABNT com a utilizada pelo AASHO (geralmente empregada para fins rodoviários). A parte mais abaixo da figura indica qual ensaio é necessário para a obtenção do diâmetro das partículas.

FIGURA 2 - CURVA GRANULOMÉTRICA



FONTE: Caputo (1988).

As curvas A, B e C são exemplos de curvas que podem ser encontradas durante a granulometria. A curva A representa um solo bem graduado e contínuo, pois possui partículas desde a argila até a areia média sem interrupções na distribuição. Na curva B é possível analisar um solo bem graduado e descontínuo, visto que entre os intervalos de argila e pedregulho não há partículas intermediárias nas classificações de areia média e grossa, causando uma quebra na curva (observada pela região com tendência horizontal). A curva C indica um solo mal graduado e contínuo, que dispõe de partículas apenas em uma classificação.

As partículas finas encontradas nas argilas trazem propriedades plásticas ao solo. A plasticidade é vista por Chioffi (1979) como a capacidade das argilas de serem moldadas em diferentes formas sem variar seu volume. Ademais, a plasticidade dos solos argilosos também depende diretamente da umidade presente. A total falta de umidade torna a argila dura e indeformável, por sua vez o excesso de água a torna semelhante a um líquido viscoso.

A superfície das partículas dos solos muito finos possuem carga elétrica negativa, que atraem a água que está ao seu redor, que por sua vez possui carga positiva, formando uma camada de água adsorvida.

Outra propriedade vinculada a solos finos é a coesão, segundo Almeida (2005, p. 21) “é a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pela qual ele se torna capaz de se manter coeso, em forma de torrões ou blocos, podendo ser cortado ou moldado em formas diversas e manter essa forma”.

### 2.1.3 Potenciais de água no solo

Para Machado (1998), a energia necessária para deslocar uma unidade de massa de água no sentido contrário ao das forças capilares, de um referencial até o nível de água livre, é representado pelo o que se chamada de potencial de água.

A equação apresentada por Baver et al. (1972) define de forma genérica o potencial de água nos solos como:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_z$$

onde  $\Psi_t$ ,  $\Psi_p$ ,  $\Psi_m$ ,  $\Psi_o$  e  $\Psi_z$  são os potenciais, respectivamente, total, pneumático, matricial, osmótico e gravitacional.

Os valores de potencial de água total podem ser encontrados em unidades de massa, volume ou peso.

Algumas parcelas podem ser desprezadas, como é o caso da parcela de potencial cinético, pois a velocidade do fluxo da água é muito baixa, outro caso é o potencial térmico, visto que os processos envolvendo o potencial total sejam considerados isotérmicos.

Já os potenciais pneumático, matricial, osmótico e gravitacional não podem ser desconsiderados, pois possuem parcelas importantes para o potencial de água total. O potencial pneumático é originado a partir da diferença de pressão externa que atua no solo e a pressão atmosférica.

O potencial matricial é o resultado da combinação das forças capilares e de adsorção presentes no solo. Quando o solo se encontra saturado esta potencial é nulo.

O potencial osmótico ocorre por causa da diferença entre as composições da água pura e da água presente no solo, a qual contém sais minerais e matéria orgânica.

Já o potencial gravitacional corresponde à energia potencial do campo gravitacional.

#### 2.1.4 Sucção

A sucção é uma tensão avaliadora da capacidade que um solo tem de reter água.

O valor de sucção total pode ser representado pelo mesmo valor do potencial total, desde que não haja nenhum processo de adensamento e que os poros do solo estejam interligados com a atmosfera, pois desta forma é possível desconsiderar os potenciais pneumáticos e gravitacionais.

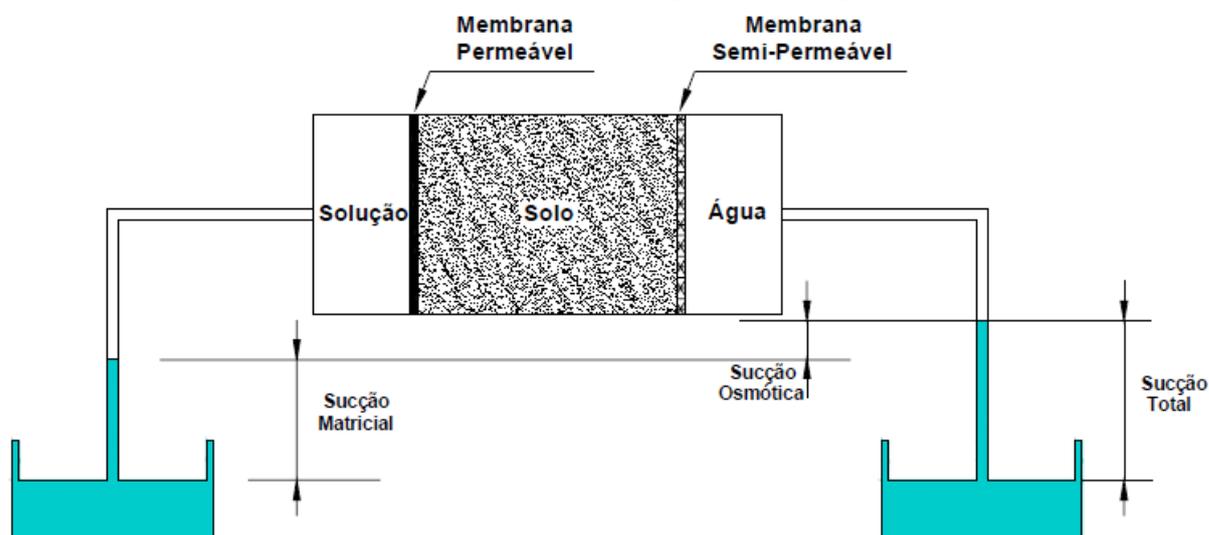
Pode-se admitir que a sucção total ( $S$ ) é a soma da sucção matricial ( $S_m$ ) e da sucção osmótica ( $S_{om}$ ).

A pressão na água ( $u_w$ ) é decorrente da interação água-ar, chamada de efeito de capilaridade, e pela interação entre as partículas sólidas e a água, onde ocorre o processo de adsorção. Estes são os responsáveis pela sucção matricial ( $S_m$ ).

Os fenômenos osmóticos ocorrem devido à presença de solutos na água, essa parcela é responsável pela sucção osmótica ( $S_{om}$ ).

A FIGURA 03 ilustra os conceitos de sucção total, matricial e osmótica, onde a membrana permeável permite a fluxo de água e sais e a membrana semipermeável permite somente a passagem de água.

FIGURA 03 – REPRESENTAÇÃO DA SUCÇÃO TOTAL



FONTE: Neto (2008)

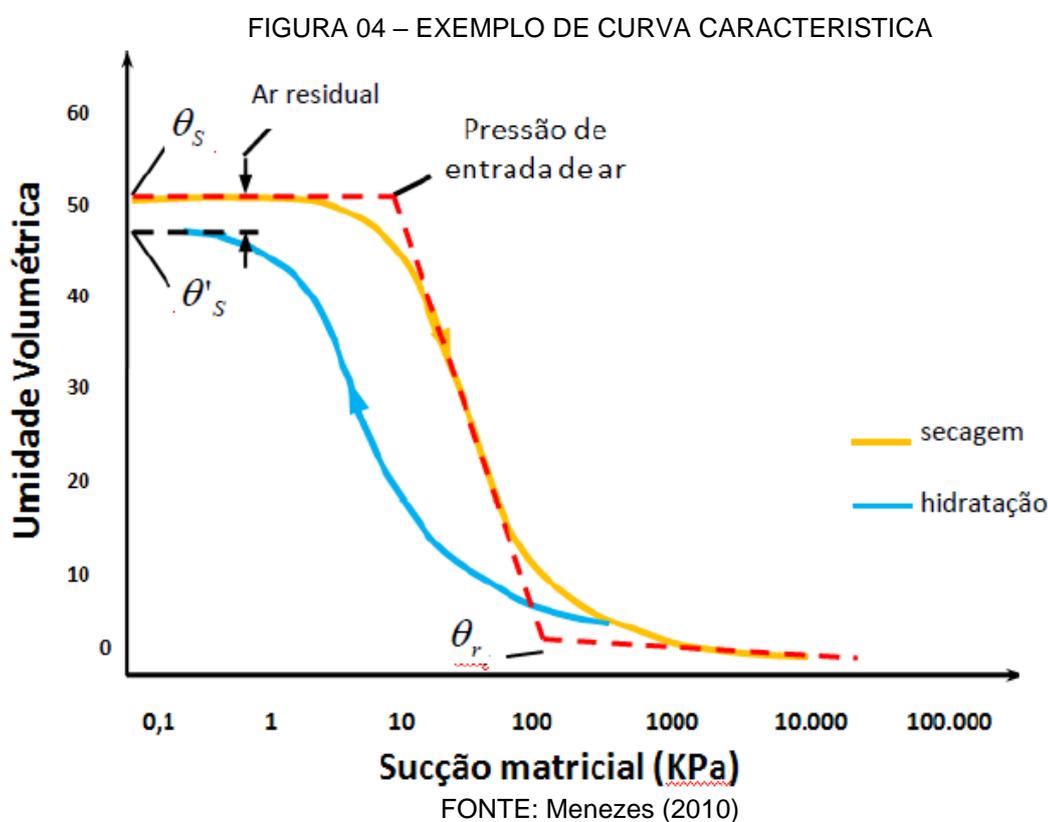
A sucção é definida como a diferença entre a pressão do ar ( $u_a$ ), normalmente considerada como a pressão atmosférica, e a pressão na água ( $u_w$ ), desconsiderando-se a pressão osmótica. Sendo, que para Menezes (2011) apenas a componente da sucção matricial governa o comportamento dos solos não saturados, de modo que a sucção total é igual a pressão do ar ( $u_a$ ) menos o valor da pressão da água ( $u_w$ ).

Reis (1998) afirma que em solos saturados, independentemente do tamanho dos vazios, todos os poros estão preenchidos por água. Quando se inicia o processo de sucção, a partir de um determinado valor da sucção, ocorrerá o início da drenagem do solo e então a entrada de ar nos poros de maior diâmetro, fazendo com que o solo saia da condição saturada.

A curva de retenção do solo, também chamada de curva característica, define a relação entre o teor de umidade seja ele gravimétrico ou volumétrico, ou grau de saturação, com a tensão de sucção.

Além da curva de retenção representar a capacidade do solo de reter água, também tem sido utilizada para a previsão de outros fatores importantes, como a condutividade hidráulica e parâmetros de resistência ao cisalhamento.

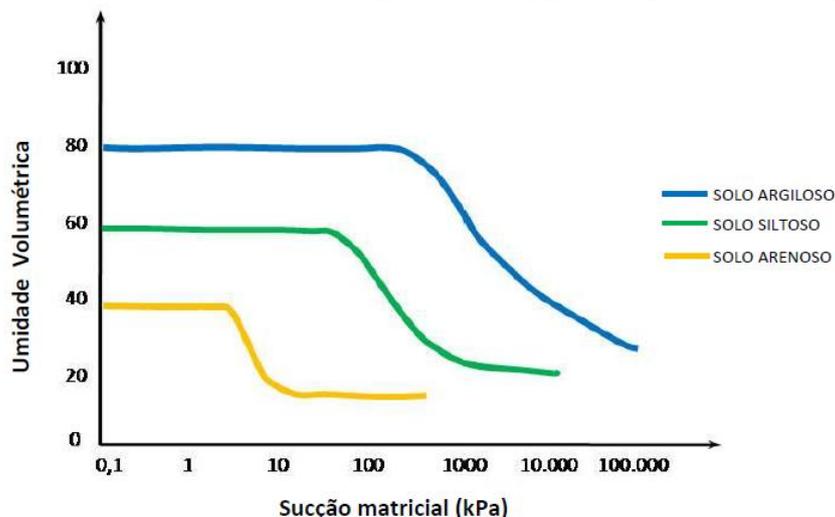
Como mostra a FIGURA 04 a determinação da curva pode ser feita de duas formas: por secagem ou por hidratação. Contudo, as diferentes formas de determinação não trazem os mesmos resultados, pois apresentam histerese, onde os pares ordenados de sucção e umidade obtidos na secagem não são os mesmos obtidos na hidratação. A histerese pode ser explicada pela geometria não uniforme dos poros, a ocorrência de bolhas de ar aprisionadas e pelas variações de volume sofridas por expansão e retração. A curva mais comum de ser encontrada é a de secagem.



Os fatores mais relevantes na curva são a umidade de saturação ( $\theta_s$ ) que mostra o valor de água para a saturação do solo, a pressão de entrada de ar que é o ponto onde o solo passa da condição saturada para a não saturada e a umidade residual ( $\theta_r$ ), que apresenta o valor para qual mesmo com um aumento significativo da sucção não se consegue extrair água.

A relação de sucção versus umidade está ligada diretamente à distribuição granulométrica, tipo de solo, densidade e a variação do teor de umidade. Enquanto a inclinação da curva depende da geometria dos poros, magnitude e composição mineralógica da fração fina contida no solo como mostra a FIGURA 05.

FIGURA 05 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ACORDO COM O SOLO



FONTE: Menezes (2010)

## 2.2 FISSURAS

As variações sazonais no ambiente submetem os solos a ciclos úmidos e secos. Durante os ciclos de seca o solo se retrai, ocasionado as fissuras que influenciam nas propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos.

Dentre as inúmeras consequências de fissuras em solo, pode-se citar os danos para as estruturas de terra, como o comprometimento da condutividade hidráulica dos solos argilosos utilizados em coberturas de aterros, que podem levar substâncias nocivas até as águas subterrâneas; ou, no campo da pavimentação, onde pequenas fissuras são os caminhos pelos quais o bombeamento de finos ocorre, podendo destruir desde o revestimento até a base.

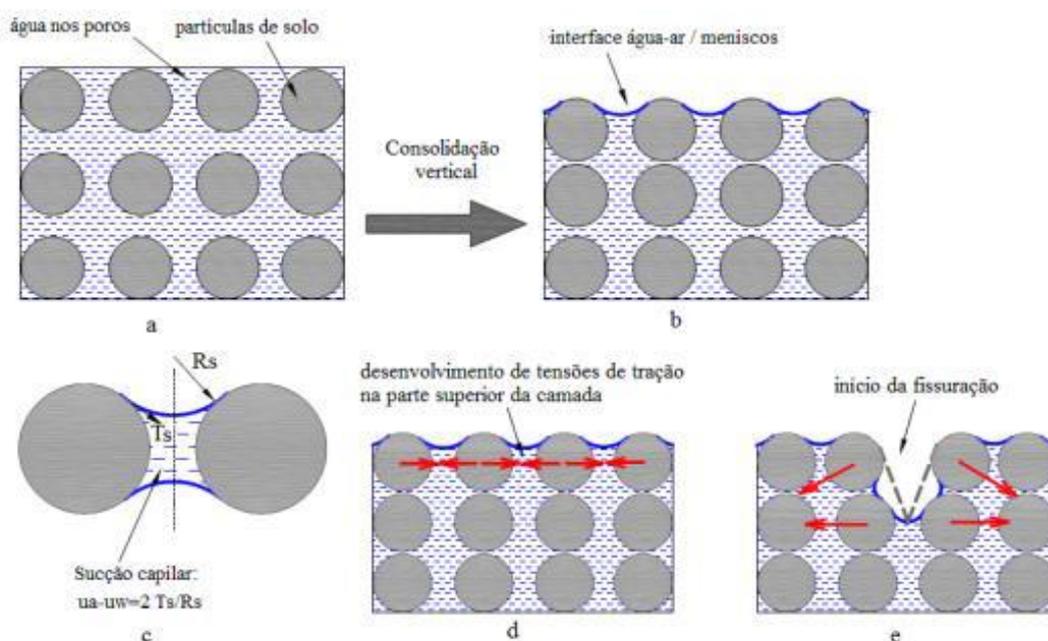
### 2.2.1 Formação de fissuras por ressecamento

A perda de umidade do solo é um fenômeno natural que pode acarretar a abertura de fissuras. Segundo Silva (2018) muitos outros fatores influenciam o fenômeno, como: umidade relativa do ar, temperatura, a composição granulométrica do solo, entre outros.

Um solo submetido ao ressecamento irá começar a fissurar quando sua resistência a tração for ultrapassada pelas solicitações. A resistência depende do teor de umidade do solo e das condições de sucção (LAKSHMIKANTHA, 2009).

O processo de fissuração é ilustrado pela FIGURA 06, considerando uma argila homogênea e saturada.

FIGURA 06: PROCESSO DE FISSURAÇÃO



FONTE: Costa (2015)

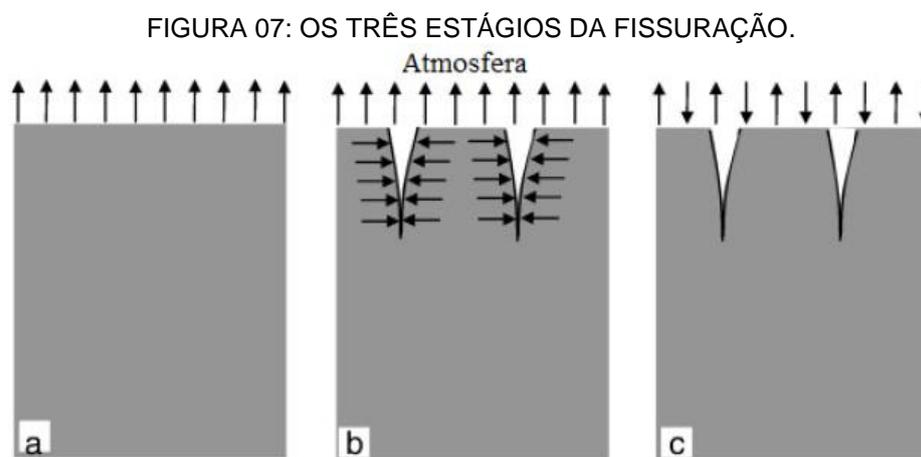
O filme de água encontrado logo acima da superfície da argila evapora primeiro e tal processo não afeta a resistência do solo e nem as forças de tensão (FIGURA 06 a). Com a continuidade da evaporação é formado um menisco entre a interface da água com o ar e as partículas de solo (FIGURA 06 b), surgindo uma sucção capilar na parte superior da camada (FIGURA 06 c). O menisco aumenta sua curvatura e a sucção e a tensão efetiva acompanham o acréscimo. Surgem, então, tensões de tração induzidas pela sucção desenvolvida entre as partículas de argila vizinhas (FIGURA 06 d). Assim que estas tensões ultrapassam a resistência a tração o solo irá fissurar (FIGURA 06 e).

Costa (2015) fala de maneira mais detalhada sobre o desenvolvimento das fissuras em três estágios. No primeiro estágio ocorre a evaporação da água presente no solo de forma unidirecional (FIGURA 07 a). As primeiras fissuras são formadas nessa etapa de acordo com a heterogeneidade do solo.

Com a aparição das fissuras, a evaporação da água passa a ocorrer também no sentido horizontal, através das paredes das aberturas. Tendo o movimento de saída de água aumentado para bidimensional, o processo de ressecamento do solo é

acelerado (FIGURA 07 b). Novos ramos de fissuras são desenvolvidos a partir das extremidades e descontinuidades das fissuras existentes, em direção aproximadamente perpendicular.

No terceiro estágio ocorre a troca de umidade entre o solo e a atmosfera, por causa do gradiente de concentração do vapor de água (FIGURA 07 c). Assim que esse gradiente zera, a taxa de evaporação se estabiliza e conseqüentemente as fissuras também se estabilizam.



FONTE: Costa (2015)

### 2.2.2 Fatores condicionantes para o surgimento de fissuras

Embora a localização interfira diretamente na fissuração dos solos, tais fatores são variáveis e sazonais por causa das condições climáticas. Silva (2018) discorre sobre seis fatores pertinentes ao solo que facilitam o surgimento de fissura, sendo eles:

- Composição do solos: a quantidade de argila presente no solo e a sua plasticidade podem acarretar em maiores valores na capacidade de retenção de água e na variação volumétrica. Segundo Lakshmikanta (2009) uma maior capacidade de reter água tem como consequência a diminuição do peso específico seco máximo.

Algumas argilas possuem propriedades expansivas. Minerais expansivos têm a característica de expandir com o alívio das tensões externas e podem aumentar seu volume na presença de água. Assim, quando ocorre o ressecamento o solo sofre uma considerável retração volumétrica.

- Teor de umidade: Tang et al (2011) analisa em seus experimentos que o teor de umidade necessário para o surgimento das primeiras fissuras aumenta com o passar dos ciclos e a partir do 4º ciclo se estabiliza. Sendo assim, o solo começa a fissurar cada vez mais com uma quantidade maior de água, em decorrência a perda de resistência sofrida entre os ciclos.
- Compactação: o valor da umidade em que o solo foi compactado define a variação volumétrica inicial do solo, onde ocorre somente a saída de água. A umidade ótima é a que apresenta a menor variação volumétrica, independente da energia de compactação utilizada. Quando a amostra de solo não é preparada na condição de umidade ótima, há uma maior quantidade de água do que de partículas sólidas, proporcionando maior espaçamento entre os grãos. Estes grãos quando submetidos ao ressecamento irão ter uma maior retração volumétrica.
- Sucção: as fissuras têm como mecanismo de causa o ressecamento e a própria sucção, gerando as fissuras nas regiões onde ocorrem as maiores perdas de água, ou seja, na superfície.
- Resistência a tração: quando as forças de tensão ultrapassam à resistência a tração do solo ocorrem as fissuras. Nos solos não saturados este parâmetro varia conforme o grau de saturação.
- Vegetação: este fator pode interferir de maneira favorável ou desfavorável ao surgimento das fissuras. A extração de água pelas raízes aumenta o ressecamento, mas a vegetação impede a radiação solar diretamente no solo, diminuindo a evaporação da água presente.

A retração volumétrica que está associada a vários dos fatores citados é uma das características mais importantes para o surgimento das fissuras. Segundo Costa (2015, pg.45), “As amostras com maiores valores de retração volumétrica apresentaram maior intensidade de fissuração”

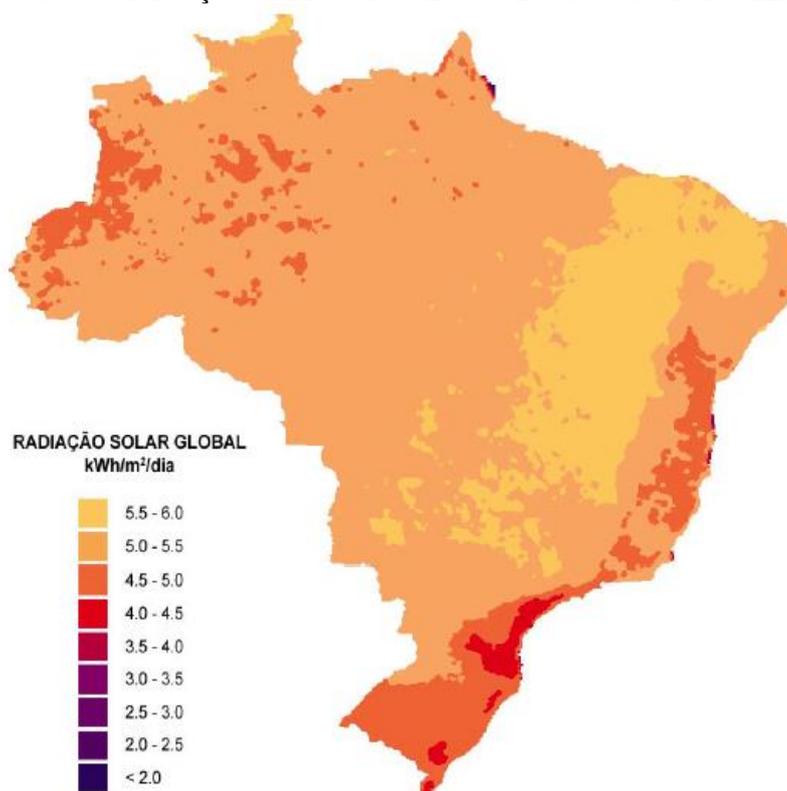
### 2.2.3 Radiação solar

A radiação é um fator climático, que varia de acordo com o local, época do ano e quantidade de irradiação solar que a superfície recebe. A radiação solar é passada para o solo como forma de calor, influenciando na velocidade da evaporação da água.

Segundo Silva (2017) o solo absorve o calor conforme o poder de refletir da superfície e o calor específico da amostra, mas esses valores mudam com a quantidade de água presente no solo.

A FIGURA 08 mostra os valores de radiação solar global anual em todo país. É possível observar que os valores na região sul possuem uma intensidade mais baixa de radiação, não ultrapassando 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

FIGURA 08: RADIAÇÃO MÉDIA ANUAL NO TERRITÓRIO BRASILEIRO



FONTE: Martins et al (2005)

Ainda, de acordo com a FIGURA 08, o estado do Paraná possui variações na quantidade de radiação que recebe ao longo do seu território.

Na TABELA 1 têm-se os valores de média mensal de radiação solar para a região Centro-Sul do estado do Paraná, local onde foram realizados todos experimentos.

TABELA 02: MÉDIA MENSAL DE RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO CENTRO-SUL DO PARANÁ

<b>Mês de referência</b>	<b>Radiação solar global (kWh/m<sup>2</sup>/dia)</b>
Janeiro	6,5 a 7
Fevereiro	6 a 6,5
Março	5 a 5,5
Abril	4,5 a 5
Maio	3,5 a 4
Junho	3 a 3,5
Julho	3,5 a 4
Agosto	4 a 4,5
Setembro	4,5 a 5
Outubro	5 a 5,5
Novembro	5,5 a 6
Dezembro	6 a 6,5

FONTE: desenvolvida pela autora com valores de Martins et al (2005)

Durante o período de um ano a região atinge seu mínimo de 3 kWh/m<sup>2</sup>/dia entre os meses de junho e julho, durante o inverno. Entre dezembro e janeiro, época de verão intenso ocorre o valor máximo de 7 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

### 2.3 CRACK INTENSITY FACTOR

O CIF ou *Crack Intensity Factor* é um fator utilizado para avaliar a fissura. O CIF utiliza a relação entre a superfície de área das fissuras e a superfície total da amostra. Esse parâmetro é obtido de imagens representativas das amostras e, por meio de programas computacionais, a superfície total é dividida em “fissurada” e “não fissurada”.

O valor de área fissurada encontrado é dividido pela área total da amostra e seu resultado é o CIF. Um mesmo solo pode apresentar mudanças na curva de retenção se forem preparados com diferentes umidades e se possuírem diferentes históricos de tensões (Silva, 2005).

## 2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

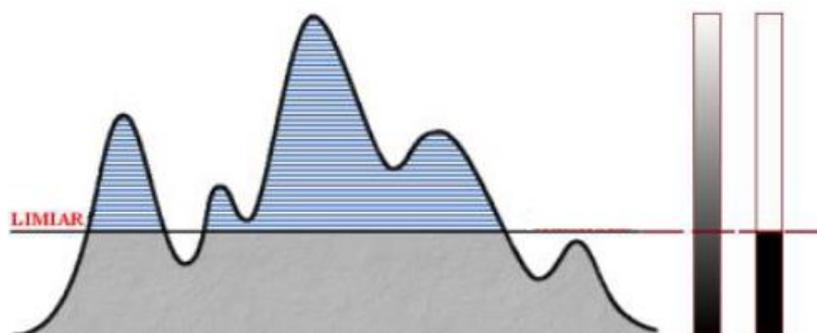
O processamento de dados de imagens permite a extração de informações específicas a partir de uma porção representativa de imagens digitais.

A primeira etapa do processamento de uma imagem refere-se à obtenção da imagem digital, a qual deve conter todos os aspectos desejados para a análise fim.

A segunda etapa é o pré-processamento, onde é realizada a filtragem das imagens, ressaltando os atributos de interesse e retirando ruídos ou informações que não serão necessários. Segundo Queiroz et al (2001), um dos métodos mais utilizados para o pré-processamento é a transformação da imagem em escala de cinza, que transforma cada pixel da imagem em um único valor.

Para a transformação da imagem em escala de cinza para uma matriz binária é necessária a binarização. A binarização consiste em converter o pixel através de um limiar, desta forma uma escala de cinza é dividida apenas em pixels pretos e brancos como mostra a FIGURA 09. Tornando uma imagem inicialmente colorida em preta e branca.

FIGURA 09: Representação de como um limite separa um sinal em duas categorias discretas



FONTE: adaptada de Silva (2017)

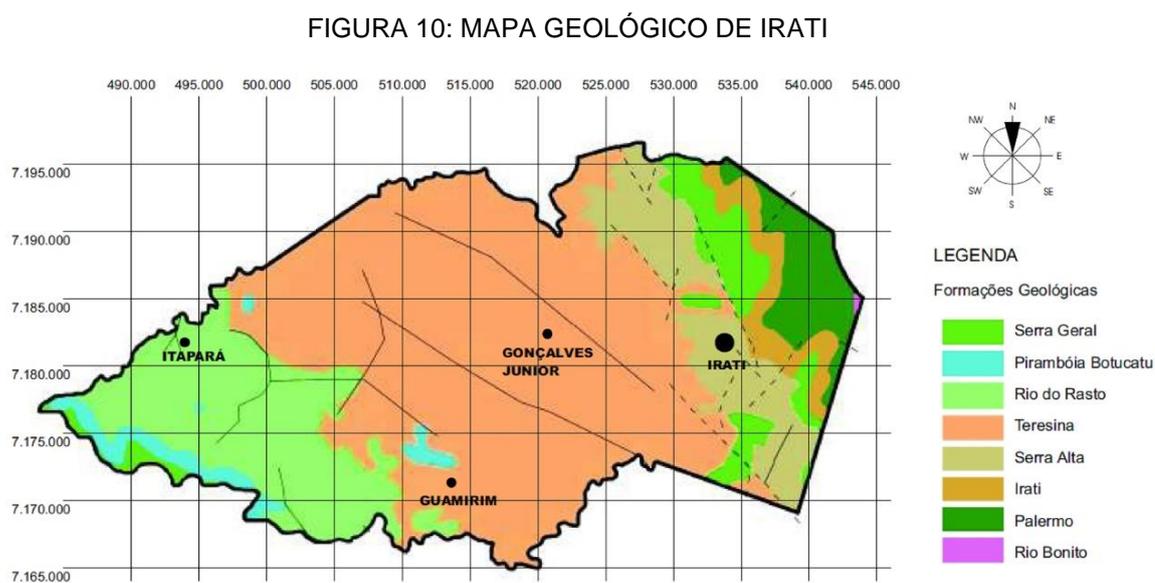
A partir disso é possível fazer a contagem dos pixels brancos e pretos e retirar as informações desejadas da imagem de forma quantitativa.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 LOCAL DE ESTUDO

O local utilizado como campo experimental fica no municio de Irati região Sudeste do Estado do Paraná, distante aproximadamente 150 km da capital do estado e 290km do municio de Pontal do Paraná.

Irati fica situada no Segundo Planalto Paranaense e está totalmente inserido sobre a Bacia Sedimentar do Paraná. Possui ao longo de seu território oito formações geológicas (FIGURA 10), sendo: Serra Geral, Pirambóia Botucatu, Rio do Rastro, Teresina, Serra Alta, Irati, Palermo e Rio Bonito, sendo a Formação Teresina predominante no município. Gonçalves Junior, Guamirim e Itapará são distritos pertencentes ao município de Irati.

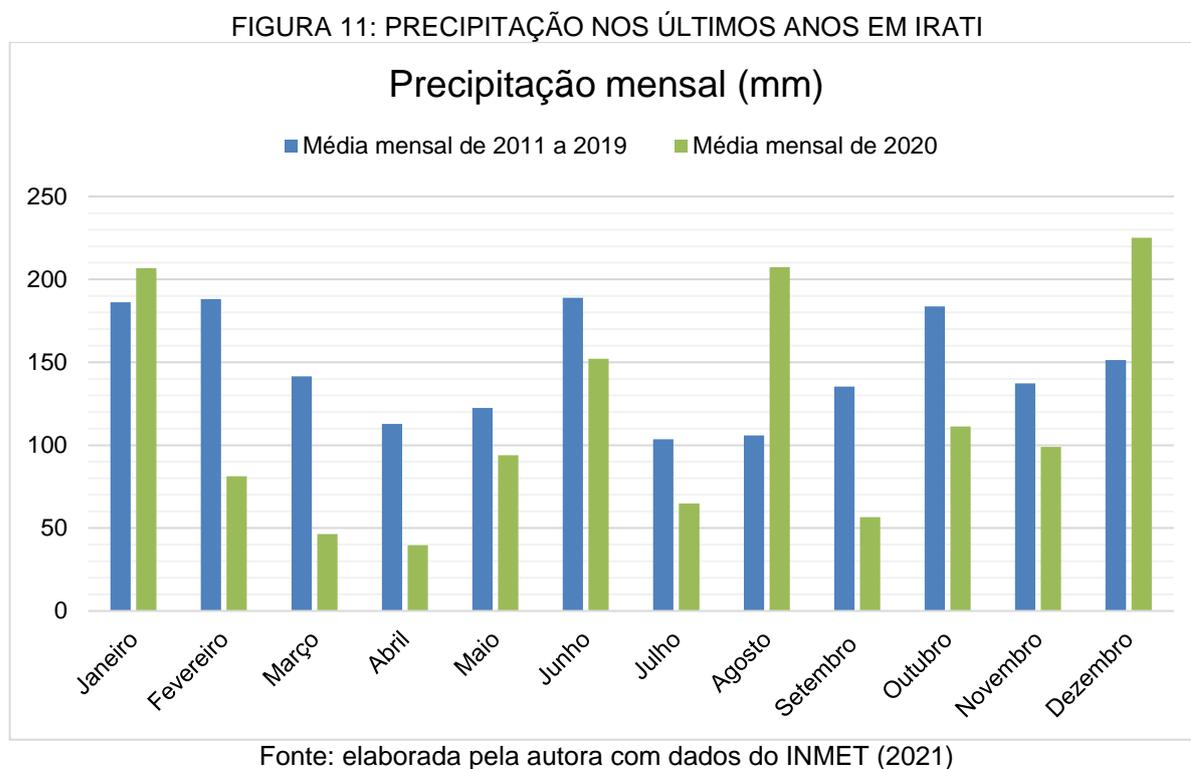


Fonte: adaptado do Plano Diretor de Irati (2010)

O clima encontrado pela classificação Kopp é o Cfb, Subtropical Úmido, caracterizado por verões frescos registrando temperaturas médias inferiores a 22°C entre os meses de setembro e abril. A estação fria começa em maio e se estende até agosto, com geadas severas e frequentes, não ultrapassando a média de 18°C.

A região não costuma possuir estações secas, mas toda a região Sul do país passou por uma severa estiagem durante o ano de 2020 como pode ser observado

na FIGURA 11, na qual comparam-se as médias mensais de chuvas nos anos de 2011 a 2019 com o cenário vivido no ano de 2020.



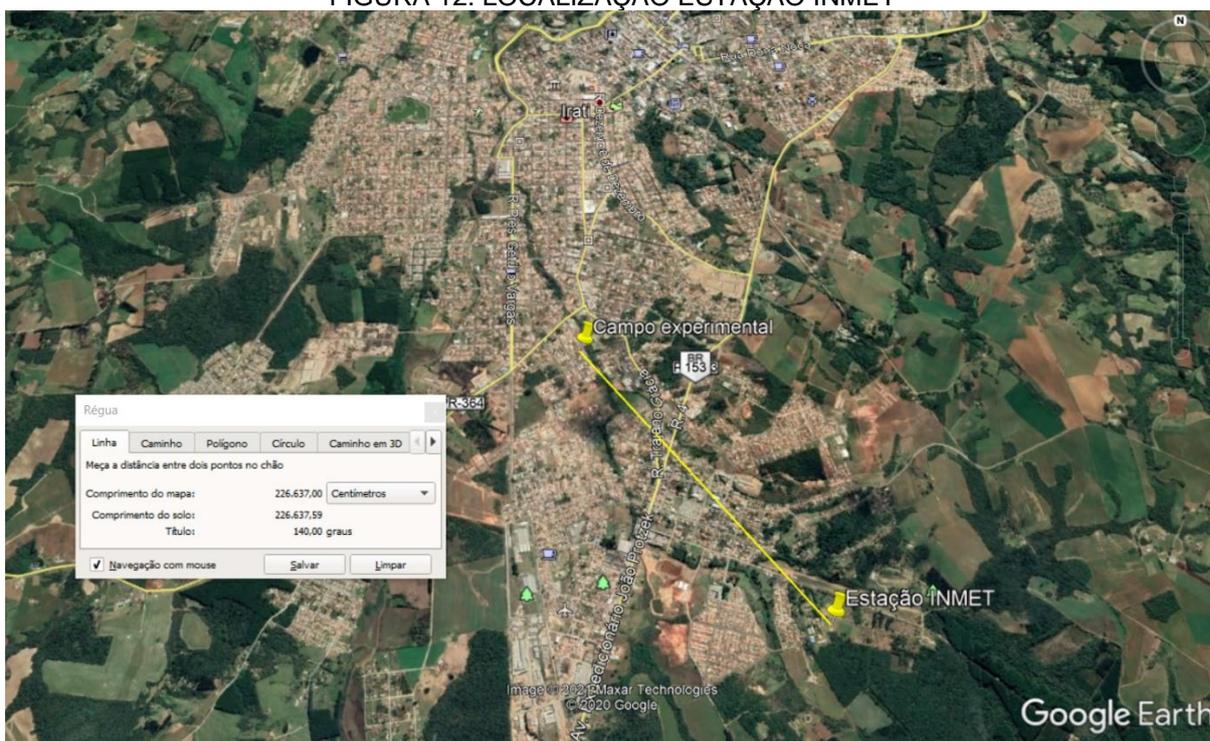
Comparando a média desses últimos anos com a situação encontrada em 2020, é possível notar a queda nas chuvas ao longo de todo o ano, com exceção dos meses de janeiro, agosto e dezembro, onde as chuvas iniciaram com mais força. A diminuição no volume de chuvas ocasionou em toda a região falta de água e consequentemente um maior ressecamento dos solos.

### 3.1.1 Estação do INMET

Para a coleta de dados foi utilizada uma estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia que está situado no Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva, na cidade de Irati, desde o dia 23 de setembro de 1966.

O Centro Estadual dista 2,3km do campo experimental (FIGURA 12), em linha reta, considerada uma distância baixa, mostrando que os dados coletados na estação são representativos para a área de exposição dos ensaios.

FIGURA 12: LOCALIZAÇÃO ESTAÇÃO INMET



FONTE: Google Earth (2021)

## 3.2 COLETA DOS SOLOS

Para se estudar o surgimento e desenvolvimento de fissuras através da irradiação solar foram coletados no dia 27 de julho de 2020 cinco tipos de solos na região de Irati. Os solos foram nomeados de solo A, B, C, D e E. Os campos de coleta foram definidos a partir de uma análise superficial de coloração, textura e presença de fissuras em condições naturais.

### 3.2.1 Localização de cada solo

Pela FIGURA 13 é possível visualizar a localização dos solos ao longo do município de Irati.

FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DOS SOLOS



FONTE: Google Earth (2020)

As amostras de solos foram coletadas nas seguintes latitudes e longitudes:

- Solo A: 25°31'0.65"S, 50°43'18.80"O.
- Solo B: 25°30'39.44"S, 50°43'31.42"O.
- Solo C: 25°30'40.86"S, 50°43'36.40"O.
- Solo D: 25°29'23.76"S, 50°39'9.49"O.
- Solo E: 25°29'19.96"S, 50°39'5.22"O.

Segundo o mapa geológico de Irati presente na FIGURA 10, podem ser classificados como formação Terezina os solos A, B e C, e formação Serra Alta os solos D e E.

### 3.2.2 Situação em que os solos se encontravam

As primeiras características observadas para a coleta das amostras foram: a presença de fissuras em sua superfície (deu-se preferência por solos já apresentando fissuras) e a presença de finos ao toque (ao se atritar o solo na palma da mão, um método utilizado em campo, as partículas finas se agreguem a superfície da mão, sendo possível uma análise preliminar da quantidade de finos – vide FIGURA 14).

FIGURA 14 – VERIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE FINOS



FONTE: a autora (2020)

Com a FIGURA 15 é possível verificar as fissuras encontradas nas superfícies dos solos. Os solos A, B e C possuíam fissuras menores e em poucas quantidades, sendo encobertas por algumas vegetações presentes.

O solo D possuía fissuras grandes, e presentes até mesmo em uma segunda camada do mesmo solo, ele foi encontrado em um terreno onde estava sendo feito o corte, retirada e posterior venda do material para o entorno do bairro, que estava em fase de execução de pavimentação asfáltica, assim o mesmo solo pode ser encontrado em vários locais com diferentes níveis de fissuração, como mostra a FIGURA 15 – SOLO D.

Já o solo E apresentava fissuras médias onde possivelmente houve um acúmulo de água, favorecendo a presença de finos na sua face superior.

FIGURA 15 – FISSURAS NOS SOLOS NO ESTADO NATURAL



FONTE: a autora (2020)

Outras características puderam ser notadas ao coletar o material para a análise (QUADRO 01), a presença de matéria orgânica e raízes, que controlaram a espessura da camada superior do solo a ser retirada. Outro fator analisado foi a umidade presente no solo no momento de retirada, que influencia no tempo de secagem do material.

QUADRO 01 – CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS EM CAMPO

Solo	Umidade	Presença de matéria orgânica na camada superior
A	Baixa	Moderada
B	Baixa	Moderada
C	Elevada	Elevada
D	Baixa	Baixa
E	Moderada	Baixa

FONTE: a autora (2020)

Para moldar duas amostras de cada solo, foi necessária à coleta de aproximadamente 25 kg de cada material, pois além de impurezas que não seriam utilizadas, com a secagem ocorre a perda de massa devido a evaporação da água. Foi retirada uma camada superficial de cerca de 30cm de profundidade e escavado um buraco até se conseguir a quantidade de material desejado.

Para o processo de secagem os solos foram espalhados em camadas finas sobre plásticos e as amostras permaneceram em ambiente aberto, exceto durante a

noite e em períodos de chuvas, quando foram colocados sobre local coberto, para evitar ganho de umidade.

A FIGURA 16 mostra a forma como os solos ficaram dispostos. Para que fosse possível perceber a chegada dos solos em suas umidades higroscópicas (umidades residuais), foram colocadas pequenas quantidades de cada material em recipientes e medidas suas massas ao decorrer dos dias. Assim que o valor encontrado para as massas de cada solos foi constante o processo de secagem foi finalizado.

FIGURA 16 – SOLOS AO AR LIVRE PARA SECAGEM



FONTE: a autora (2020)

### 3.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

Foram feitas dez amostras, sendo duas unidades de cada solo. Os solos foram separados em dois grupos, o Grupo 1 foi exposto às ações climáticas, sendo as mais importantes para este estudo a chuva e a radiação solar e o Grupo 2 que permaneceu em local coberto, evitando a presença das ações citadas.

### 3.3.1 Materiais utilizados

- Solos em umidade higroscópica (cinco solos);
- Peneiras com fundo e tampa para análise granulométrica com aberturas de 2, 4,75 e 0,075 milímetros;
- Instrumento para destorroar os solos;
- Recipientes para acomodar os solos;
- Soquete para compactação com cerca de 2500g;
- Balança;
- Plástico filme;
- Sacos plásticos herméticos;
- Recipientes plásticos;
- Colheres;
- Tripé para realizar as imagens do dia a dia, e
- Celular com câmera.

### 3.3.2 Soquete para compactação

O soquete utilizado foi fabricado pela autora utilizando as mesmas dimensões e peso do soquete pequeno de compactação da NBR 7182 – Ensaio de Compactação (1986). A referida norma estipula que o diâmetro da base em contato direto com o solo compactado seja igual a 50 mm  $\pm$ 5 mm e que sua massa seja igual a 2500 g  $\pm$ 10g.

O soquete desenvolvido foi feito a partir de um tubo de PVC com 53 mm de diâmetro externo. A extremidade onde seria a base foi lixada para garantia de um ângulo reto e, então, recebeu uma camada de plástico filme. O tubo de PVC foi então enchido com uma massa feita com concreto, água e chumbadas de pesca, que possuem uma alta densidade. Dessa forma, foi possível chegar ao peso esperado sem necessidade de uma altura muito elevada.

A FIGURA 17 mostra a aparência do soquete em PVC e a massa final de 2496g, pesado em uma balança com precisão de 1g, estando assim dentro do limite estipulado pela NBR 7182.

FIGURA 17: SOQUETE PARA COMPACTAÇÃO



FONTE: a autora (2020)

### 3.3.3 Preparo das amostras

Todas as dez amostras foram preparadas da mesma forma, apenas a quantidade de água utilizada para cada tipo de solo foi alterada de acordo com a necessidade do mesmo.

Com todos os solos secos até atingirem suas respectivas umidades higroscópicas, os solos foram destorroados. Este processo consiste em desagregar as partículas que estão unidas em torrões sem comprometer a estrutura dos grãos.

FIGURA 18: PROCESSO DE DESTORROAMENTO DOS SOLOS



FONTE: a autora (2020)

Para isso foi utilizado um utensilio em madeira apresentado na FIGURA 18, semelhante a uma mão de grau, junto a um recipiente plástico. Com movimentos circulares pressionando o solo contra o recipiente os torrões foram sendo desagregados.

Com todo solo desagregado, foram utilizadas as peneiras granulométricas para a separação do material por diâmetro, pois para as amostras somente as partículas finas com diâmetro máximo de 2mm foram utilizadas.

As peneiras foram montadas em uma pilha em ordem decrescente como mostra a FIGURA 19. A primeira peneira foi a de 4,75 mm, seguida pela de 2mm e pela de 0,075mm, o fundo foi adicionado logo abaixo da peneira de 0,075mm, para conter as partículas passantes. A peneira de 0,075mm foi utilizada somente em uma pequena porção dos solos, para uma análise grosseira de material fino encontrado em cada solo, pois para uma análise correta deve ser usado o processo de sedimentação.

FIGURA 19: PENEIRAS GRANULOMÉTRICAS



FONTE: a autora (2020)

O processo de separação das partículas com as peneiras foi feito de maneira manual. Após se inserir uma quantidade pequena de material sobre a primeira peneira e colocar a tampa o conjunto era chacoalhado por cerca de 5 minutos e ficava em

repouso por mais 2 minutos, para que todos os finos em suspensão pudessem se acomodar. O material passante pela peneira de 2mm, mostrado na FIGURA 20 foi separado para o preparo das amostras, enquanto o não passante foi descartado.

FIGURA 20: SOLO UTILIZADO PARA ELABORAÇÃO DAS AMOSTRAS



FONTE: a autora (2020)

Foram utilizadas 5000 g de solo seco, destorroado e peneirado para a preparação de cada amostra. Para ser possível a compactação dos solos nos recipientes, foi adicionada água.

Em um recipiente plástico foram colocadas 5000 g de solo e água suficiente para que a mistura, depois de totalmente homogênea com ajuda de colheres metálicas, formasse uma pasta. Como cada solo difere em possui suas propriedades plásticas, a quantidade de água para cada um chegar a mesma consistência foi diferente.

TABELA 03 – QUANTIDADE DE ÁGUA PARA CADA SOLO.

<b>Solo</b>	<b>Quantidade de água utilizada (g)</b>	<b>Teor de umidade inicial (%)</b>
A	1500	33,1
B	1500	33,1
C	1800	43,4
D	2100	47,6
E	2200	50,8

FONTE: a autora (2020)

A TABELA 03 mostra a quantidade final de água colocada em cada solo. Com o auxílio de uma balança eram adicionados 150g por vez e assim que solo e água eram misturados, era verificada a necessidade ou não de mais água. Seguindo esse mesmo processo até se encontrar a quantidade julgada ideal. Os pares de amostra do mesmo solo receberam a mesma quantidade de água.

Para confeccionar as amostras foram utilizados recipientes plásticos com diâmetro médio de 22,78cm. A base do recipiente possuía furos (FIGURA 21) para possibilitar o escoamento da água vinda da chuva.

FIGURA 21 – RECIPIENTE UTILIZADO PARA AS AMOSTRAS



FONTE: a autora (2020)

Para realizar a compactação, a pasta de água e solo foi dividida com o auxílio da balança em três camadas de mesma massa. Cada uma das três camadas eram depositadas no recipiente plástico final da amostra e compactadas com 35 golpes com altura de queda do soquete de 3 cm, como mostra a FIGURA 22.

FIGURA 22 – CAMADAS PARA COMPACTAÇÃO



FONTE: a autora (2020)

Com a o diâmetro do vaso e alturas finais das amostras após a compactação foi possível calcular a energia de compactação através da fórmula prevista na NBR 7182 - Ensaio de compactação (1986):

$$E=(P \times h \times N \times n) / V$$

onde P é o peso do soquete; H é a altura de queda so soquete; N é o número de golpes por camada; né o número de camadas; V é o volume final da amostra.

A TABELA 04 mostra os valores das alturas finais de cada vaso e a energia de compactação que cada amostra recebeu.

TABELA 04 – VALORES OBTIDOS PARA A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

Solo / Grupo	Altura final da amostra (cm)	Energia de compactação(g/cm <sup>2</sup> )
A / 1	7,91	243,77
B / 1	7,91	243,77
C / 1	7,98	241,64
D / 1	8,00	241,03
E / 1	8,05	239,54
A / 2	7,91	243,77
B / 2	7,91	243,77
C / 2	7,98	241,64
D / 2	7,75	248,81
E / 2	8,05	239,54

FONTE: a autora (2020)

A camada final foi alisada com uma colher metálica para que não fosse possível perceber imperfeições, assim seria mais fácil reconhecer as primeiras fissuras formadas. A FIGURA 23 mostra todas amostras juntas antes de serem levadas aos locais para dar início ao processo de fissuração.

FIGURA 23 – AMOSTRAS PREPARADAS



FONTE: a autora (2020)

Após o preparo de todas as amostras no dia 21 de agosto de 2020 os solos do Grupo 1 foram colocados ao ar livre e os solos do Grupo 2 em local coberto para dar início ao processo de fissuração.

### 3.3.4 Caracterização dos solos

Após o processo de destorroamento dos solos cerca, de 5000g de cada tipo de solo foram levadas para análise de suas características no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná.

Para definir a umidade higroscópica dos solos foram separadas 500g de cada material, logo antes deles serem misturados com água para preparar as amostras. Esse material foi colocado em sacos plásticos herméticos etiquetados com suas massas, data e hora do armazenamento. Em seguida foram deixados dentro de uma caixa térmica (FIGURA 24), com o propósito de manter a umidade, sem acréscimos ou perdas. Esse material também foi levado para análise em laboratório.

FIGURA 24 – MATERIAL COLETADO PARA ANÁLISE DE UMIDADE HIGROSCÓPICA



FONTE: a autora (2020)

A TABELA 05 mostra os valores obtidos na caracterização.

TABELA 05 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

Solo	A	B	C	D	E
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,56	2,11	2,36	2,61	2,55
Umidade higroscópica (%)	2,32	2,35	5,18	3,81	4,53
Limite de liquidez (%)	34,51	35,84	58,02	58,45	85,41
Limite de plasticidade (%)	24,71	22,61	33,92	53,90	52,80
Índice de plasticidade (%)	9,8	13,23	24,1	4,55	32,61
Quantidade de silte (%)	91,0	93,8	93,8	96,8	97,8
Quantidade de argila (%)	36,4	48,7	72,8	85,2	65,3

FONTE: a autora (2021)

Para a obtenção dos valores de massa específica dos grãos foi utilizada a DNER-ME 093/1994, que determina o procedimento para a obtenção dos valores de densidade.

Através do ensaio regido pela ABNT NBR 6508:1984 foram obtidos os valores de umidade natural, ou umidade higroscópica. Durante a coleta do material foi elaborado o QUADRO 01, que trouxe de maneira qualitativa as características de umidade presentes naquele momento. Essas características foram confirmadas em ensaio, onde os solos C e D obtiveram as maiores umidades naturais, acima de 4,5%.

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram feitos de acordo com a ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016, respectivamente.

Com o ensaio de análise granulométrica (ABNT NBR 7181:2016) foi possível verificar que todos os solos possuem alta presença de material fino em sua composição. Os solos com maiores valores de argila, partículas mais finas, são o D, C, e E, com valores acima de 50%. Confirmando assim o que já havia sido percebido durante a coleta ao se realizar o ensaio de presença de finos ao toque.

### 3.4 ANÁLISE DE FISSURAS

Para um melhor entendimento do surgimento e evolução das fissuras nos solos, foi registrado diariamente através de câmera fotográfica as amostras. A câmera ficou posicionada em um tripé confeccionado com tubos de PCV como mostra a FIGURA 25. Esse equipamento teve como propósito fixar a altura em que as imagens eram feitas.

FIGURA 25 – TRIPÉ



FONTE: a autora (2020)

Para que as imagens fossem feitas no mesmo local, foram colocados marcos em madeira em quatro cantos. Estes foram utilizados como referência na hora de se posicionar o tripé sobre as amostras.

Com as fotos realizadas, as imagens foram processadas no *software* gratuito *ImageJ*.

Dentro do *software* foram preestabelecidos padrões para que todas as imagens obtivessem os mesmos resultados.

As imagens iniciais possuíam altura e largura de 3000 pixels. Para se desconsiderar a área ao redor das amostras que não eram de interesse, foi realizado o recorte com um círculo centralizado na imagem com diâmetro de 1900 pixels.

O limiar utilizado para a binarização das imagens foi de 90, valor que garantiu a melhor visibilidade das fissuras.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 SOLOS EXPOSTOS

Os resultados foram divididos em ciclos. Um ciclo tem seu início quando surge a primeira fissura no solo e é finalizado assim que ocorre uma chuva que elimine todas as fissuras da superfície da amostra.

Durante alguns ciclos ocorreram chuvas, mas elas apenas diminuíram as fissuras, não caracterizando um novo ciclo. Todos os solos foram expostos no dia 21 de agosto de 2020 no mesmo local. Os recipientes contendo as amostras foram espaçados com cerca de 50 centímetros de cada lateral, para que não houvesse grandes discrepâncias em relação as chuvas e irradiação solar recebidos. O ciclo inicial de todos os solos não recebeu precipitação antes de seu início, somente a água que foi utilizada para moldar as amostras. Esse ciclo foi o mais longo, durando em torno de 36 dias, dependendo de cada solo. Neste período, as laterais do solos que estavam em contato com o recipiente se contraíram devido à longa quantidade de tempo sem receber água, criando um espaçamento muito grande. Como a intenção era de que a água escoasse apenas pelo solo e suas fissuras, foi adicionada uma pasta a base de água e bentonita nas laterais. A bentonita é utilizada para a impermeabilização, impedindo assim a entrada de água.

Com a adição da bentonita parte da área superior que estava com esse produto teve que ser desconsiderada no processamento de imagens. Foi necessário então o recorte das imagens, mas esse processo não prejudicou a representatividade da amostra final.

A seguir, explana-se como ocorreram os ciclos. Escolheu-se mostrar aqui o ciclo inicial, o final e um intermediário. Os outros ciclos podem ser vistos nos apêndices.

Para cada ciclo foram desenvolvidas tabelas com as datas iniciais e finais e a precipitação recebida antes do início do ciclo e durante o ciclo. Os valores de radiação solar contados em horas representam o tempo em que os solos receberam de forma direta os raios solares.

#### 4.1.1 Solo A

##### 4.1.1.1 Ciclo inicial – Ciclo 1

O ciclo 1 teve início no dia 22 de agosto e foi finalizado no dia 26 de setembro, totalizando 36 dias corridos, como mostra a TABELA 06.

TABELA 06 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 1, SOLO A

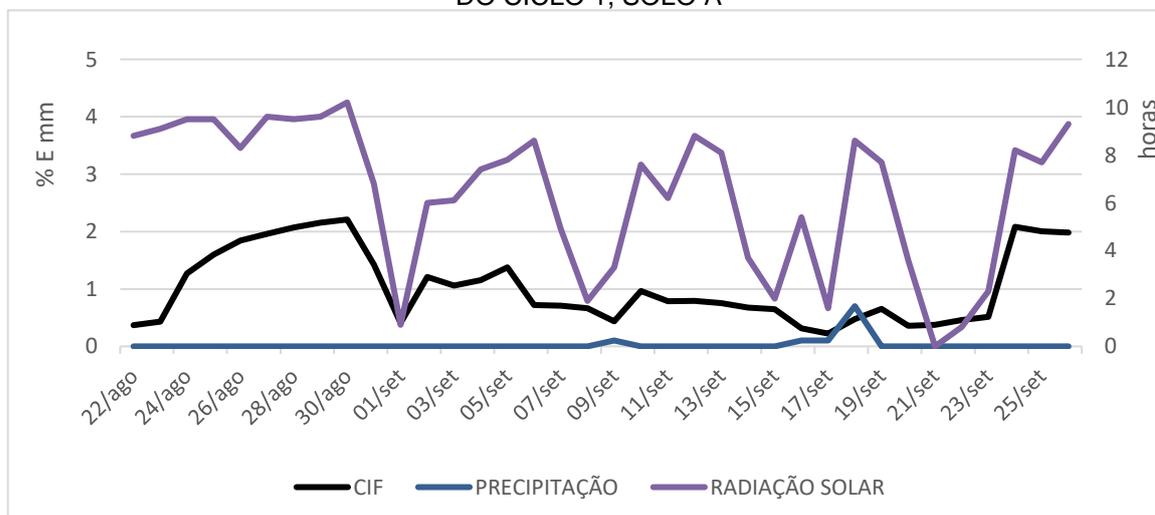
Data de início	22/08/2020
Data de término	26/09/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	0
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	229,4
Radiação solar média diária (h)	6,37

FONTE: a autora (2021)

Analisando a FIGURA 26 é possível visualizar a relação entre o CIF e a radiação solar. Quando ocorre uma diminuição na radiação solar recebida pela camada superior do solo, a fissuração também diminui, voltando a aumentar com valores maiores de radiação.

Nos dias 09/09/2020, 16/09/2020 e 17/09/2020 o CIF diminui, decorrente a água da chuva que incidiu sobre o solo e que diminuiu as fissuras. Essa água infiltrada no solo possui uma área de evaporação maior, pois agora conta com as laterais das fissuras existentes. Uma evaporação mais rápida resulta em um acréscimo de fissuras também mais rápido, isso é mostrado na FIGURA 26 no dia logo após as chuvas.

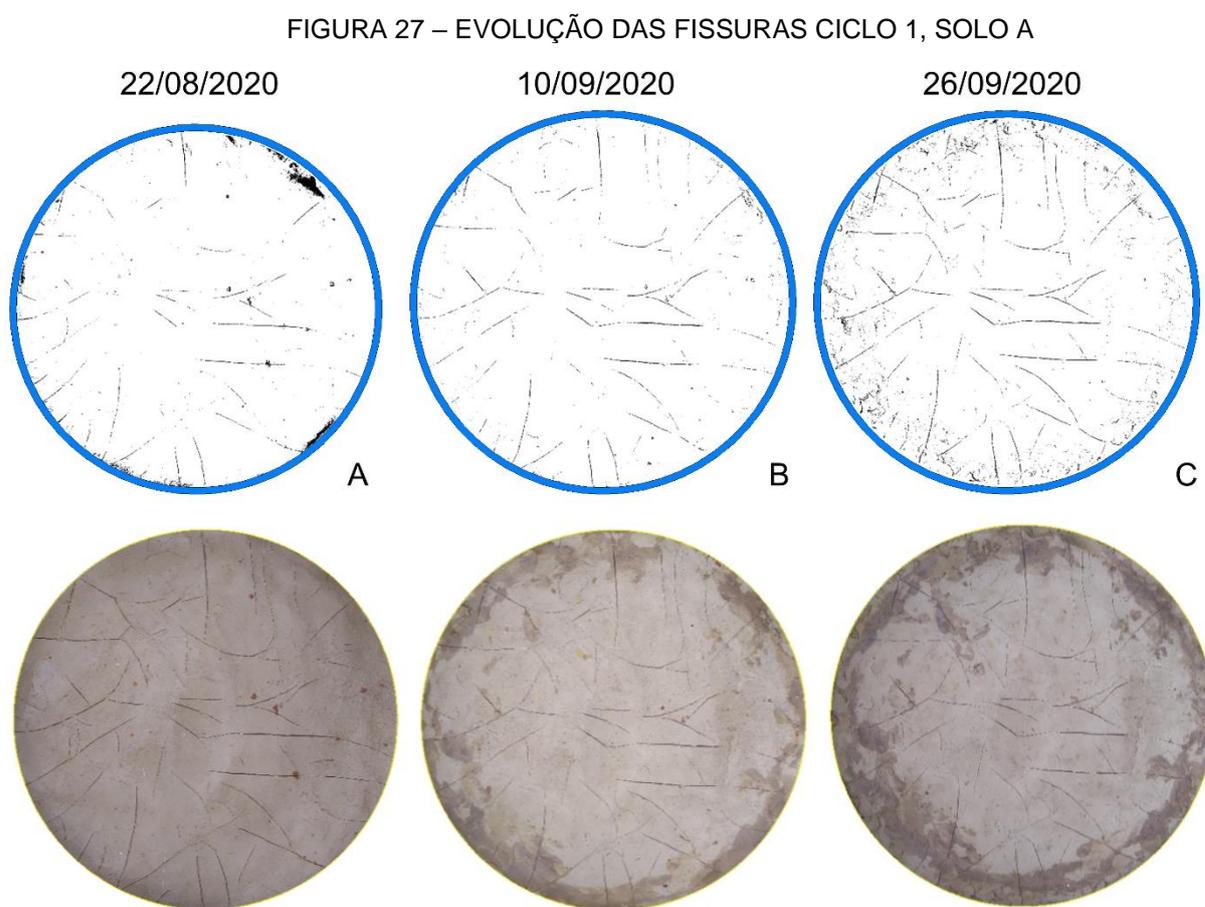
FIGURA 26 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 1, SOLO A



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 27 representa a evolução da fissuração durante o primeiro ciclo do solo B. As imagens foram escolhidas para demonstrar um processo crescente das fissuras, o que não ocorre de fato, pois as fissuras aumentam e diminuem ao longo de seu ciclo.

O padrão de fissuração segue as primeiras fissuras formadas. Ao longo do tempo surgem as fissuras secundárias e as dimensões são ampliadas.



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.1.2 Ciclo intermediário – Ciclo 6

O sexto ciclo do solo A iniciou no dia 01 de outubro e recebeu 22,6 mm de chuva antes de seu início, no dia 09 de outubro. O ciclo total teve 10 dias e contou com uma chuva de 6mm, como mostra a TABELA 07.

TABELA 07 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 6, SOLO A

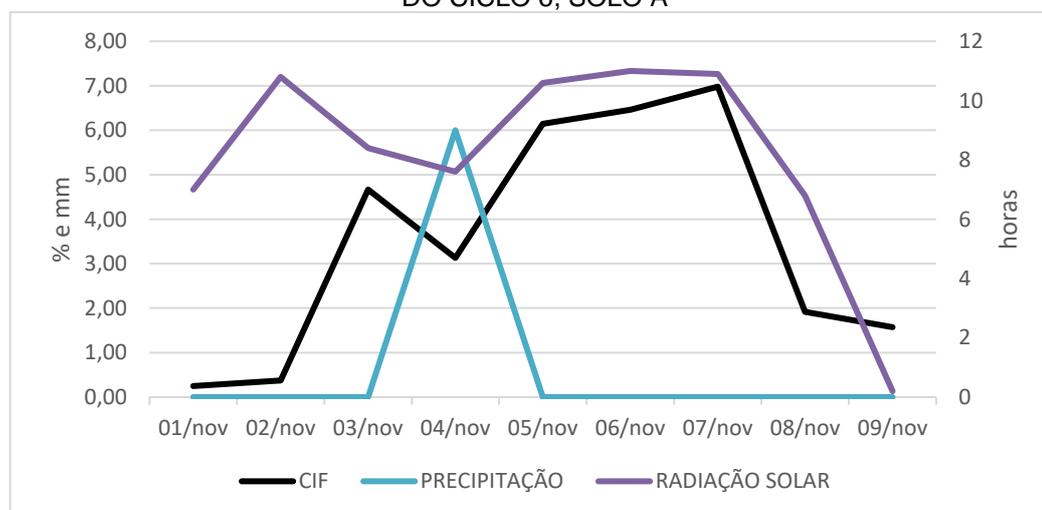
Data de início	01/10/2020
Data de término	09/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	73,3
Radiação solar média diária (h)	8,14

FONTE: a autora (2021)

No início da fissuração, quando ainda havia uma quantidade de água significativa, o solo fissurou com maior velocidade, mas ainda assim as curvas do CIF e da radiação solar caminham próximas. No dia 4 de novembro ocorreu uma chuva de 6 mm que diminuiu a intensidade da radiação solar e do CIF.

Novamente após a chuva, as fissuras aumentaram a intensidade. No final do ciclo ocorreu uma diminuição nas fissuras decorrente da diminuição na radiação solar (FIGURA 28).

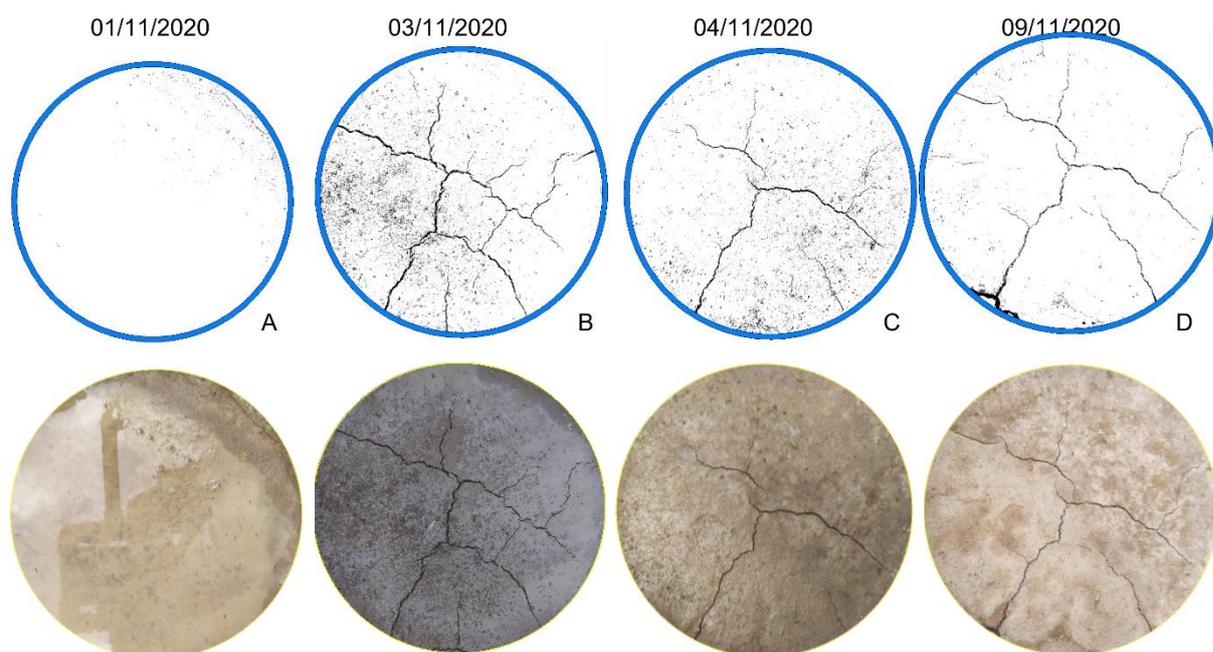
FIGURA 28 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 6, SOLO A



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 29 mostra os 4 estágios principais desse ciclo. O primeiro (FIGURA 29 – A) é o início do processo, com uma pequena fissura lateral que não prosseguiu. A imagem do dia 03 de novembro é como as fissuras estavam antes do solo receber a chuva e, em seguida no dia 04 de novembro, como as fissuras ficaram. Observa-se que elas diminuíram seus tamanhos, mas mantiveram as mesmas características das anteriores (FIGURA 29 – B e C). No último dia do ciclo as fissuras permaneceram com as mesmas propriedades (FIGURA 98 – C).

FIGURA 29 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS CICLO 6, SOLO A



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.1.3 Ciclo final – Ciclo 8

O último ciclo do solo A foi antecedido por uma chuva de 25,2mm. As primeiras fissuras se desenvolveram no dia 21 de novembro e seguiram até o dia 27 de novembro, com duração total do ciclo de 7 dias, como mostra a TABELA 08.

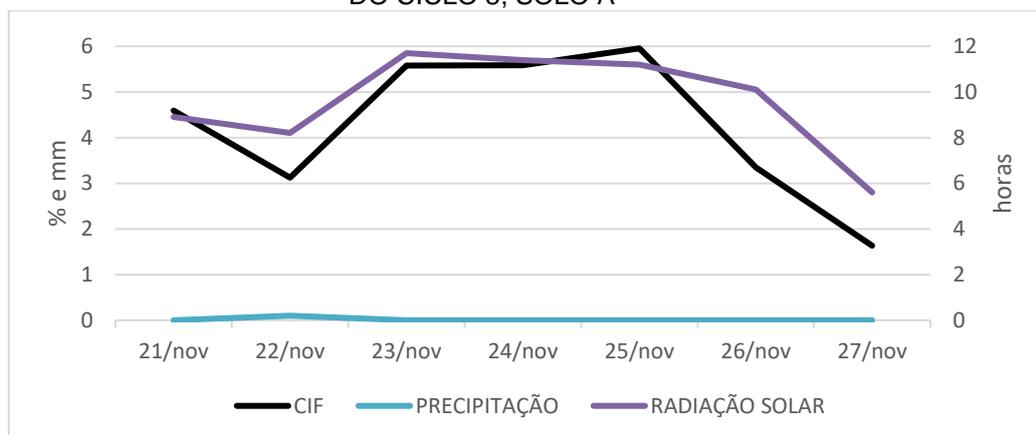
TABELA 08 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 8, SOLO A

Data de início	21/11/2020
Data de término	27/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	25,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	67,1
Radiação solar média diária (h)	9,59

FONTE: a autora (2021)

O solo recebeu uma chuva de 0,1mm (FIGURA 30), provocando um decréscimo no CIF, logo em seguida as fissuras seguiram acompanhando a radiação solar diária.

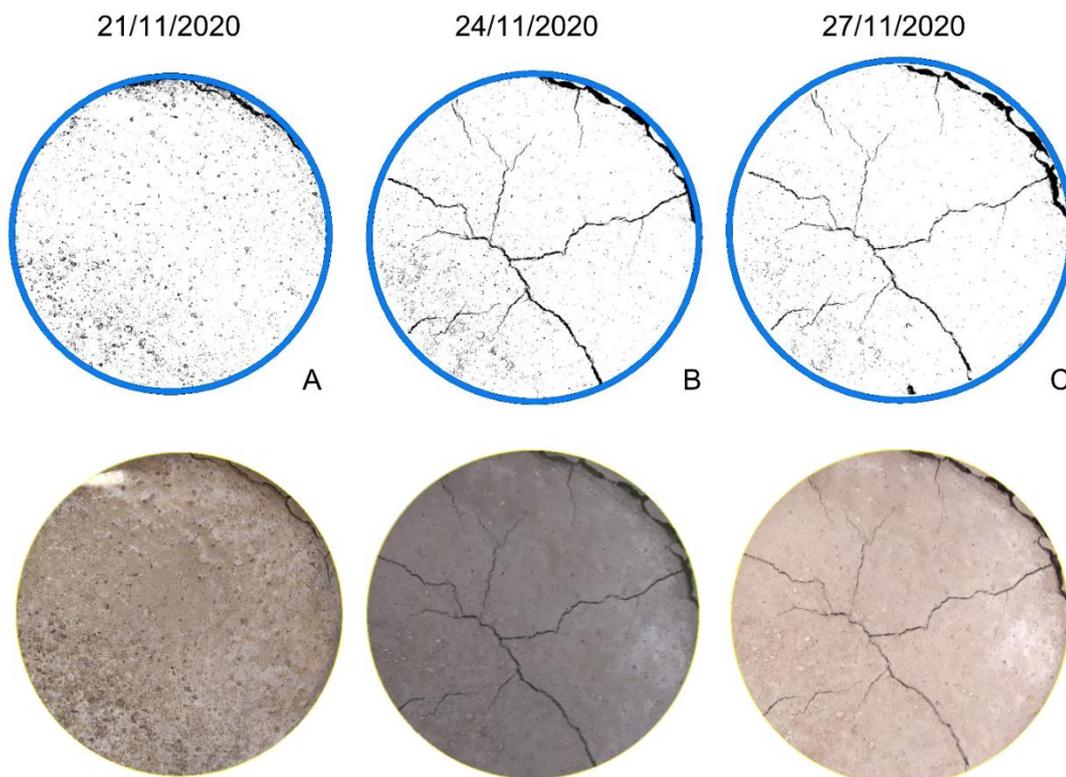
FIGURA 30 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 8, SOLO A



FONTE: a autora (2021)

No primeiro dia do ciclo é possível visualizar a formação de uma fissura paralela à borda do recipiente (FIGURA 31 – A). Essa fissura evoluiu ao longo dos dias (FIGURA 31 – A e B) e torna-se a mais imponente fissura apresentada em todos os ciclos do solo A. Os ciclos 1, 6 e 8 apresentaram padrões de fissuração diferentes, mostrando que a água recebida pela chuva entre ciclos era suficiente para encerrar o ciclo anterior.

FIGURA 31 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS CICLO 8, SOLO A



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.2 Solo B

##### 4.1.2.1 Ciclo inicial – Ciclo 1

O ciclo 1 teve início no dia 21 de agosto de foi finalizado no dia 26 de setembro, totalizando 37 dias corridos, um dia a mais em comparação ao solo A, que teve seu início somente no dia 22 de agosto como mostra a TABELA 9.

TABELA 9 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 1, SOLO B

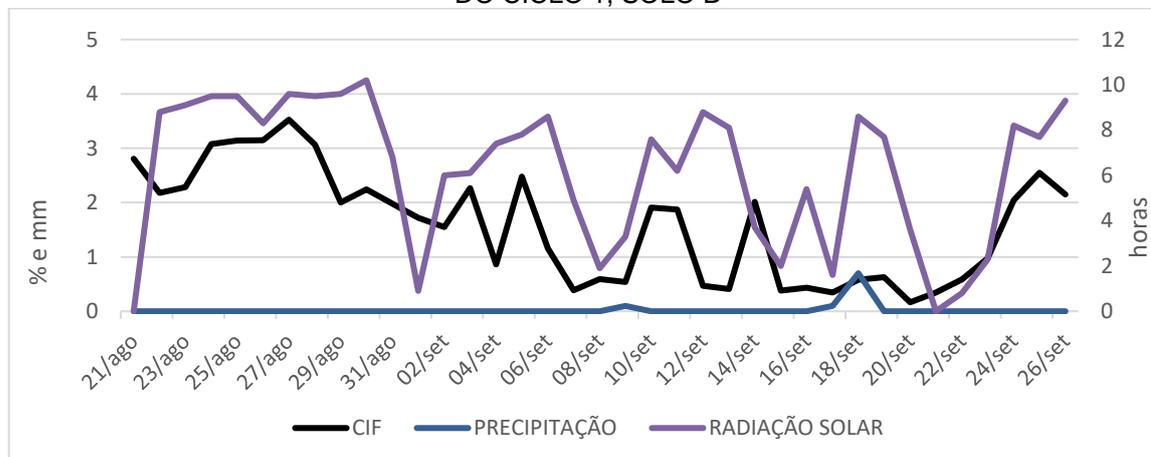
Data de início	21/08/2020
Data de término	26/09/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	0
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,9
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	229,4
Radiação solar média diária (h)	6,20

FONTE: a autora (2021)

Analisando a FIGURA 32 verifica-se uma instabilidade nas fissuras no início, logo em seguida a radiação solar e o CIF voltam a demonstrar o comportamento visto no solo A e caminham de forma similar.

Nos dias 09/09/2020, 16/09/2020 e 17/09/2020 o CIF diminuiu, decorrente da água da chuva que incidiu sobre o solo, diminuindo as fissuras. Já é possível notar um comportamento padrão nos solos: após chuvas que não encerram os ciclos, as fissuras tendem a se desenvolver com maior velocidade.

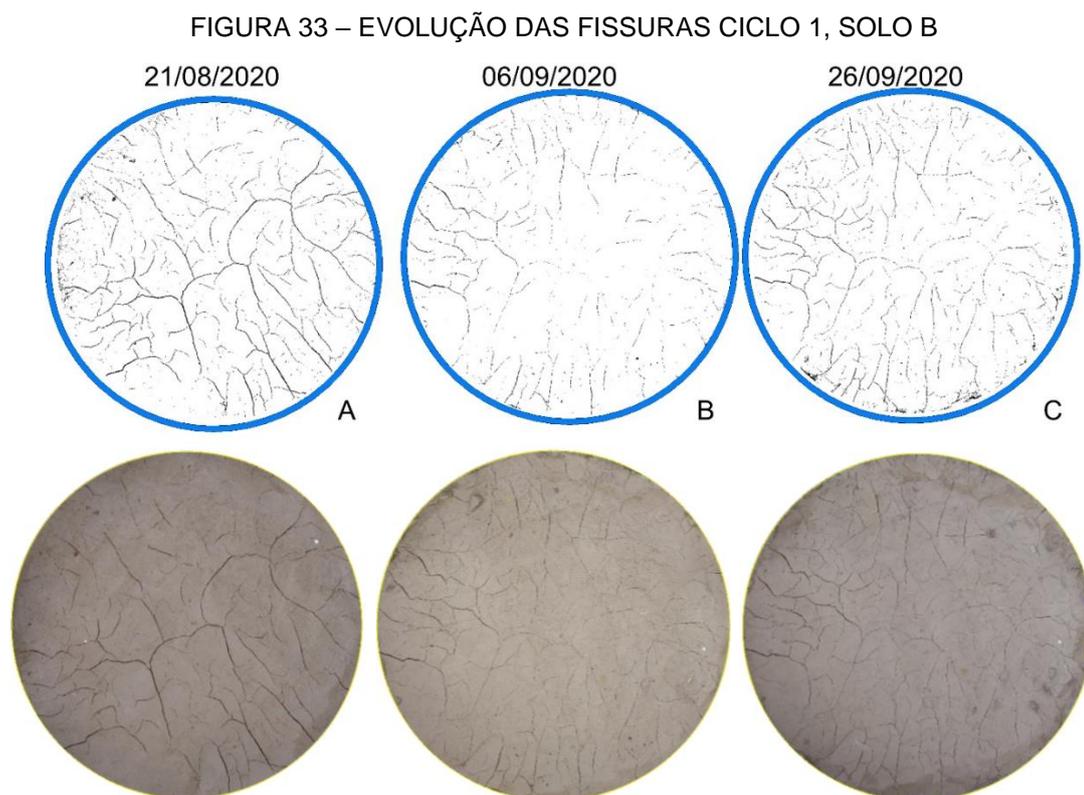
FIGURA 32 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 1, SOLO B



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 33 representa a evolução da fissuração durante o primeiro ciclo do solo B. Na FIGURA 33 – B é possível perceber o decréscimo sofrido pela diminuição da radiação solar durante alguns dias anteriores.

O valor do CIF inicial e final para esse ciclo foi muito próximo, tendo uma queda de apenas 0,66%. Pela FIGURA 33 pode ser analisada essa pequena diferença nos dias 21 de agosto e 26 de setembro, onde as imagens são muito semelhantes.



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.2.2 Ciclo intermediário – Ciclo 4

O quarto ciclo do solo B teve início no dia 17 de outubro e recebeu 17,8 mm de chuva antes de seu início, sendo finalizado no dia 24 de outubro. O ciclo total teve 8 dias, como mostra a TABELA 10.

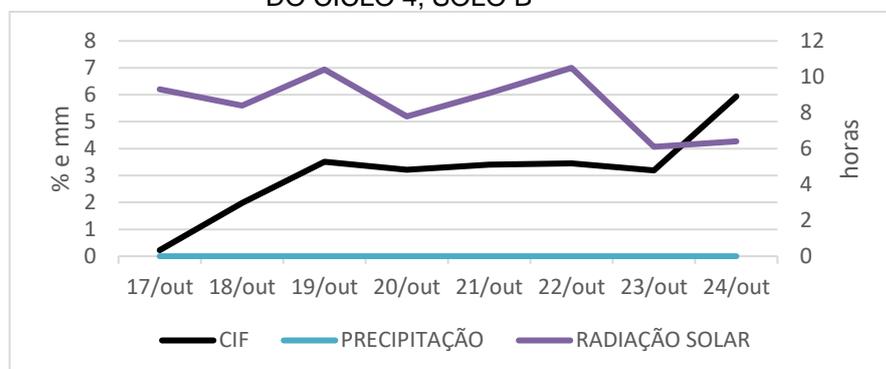
TABELA 10 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 4, SOLO B

Data de início	17/10/2020
Data de término	24/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,8
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	68
Radiação solar média diária (h)	8,50

FONTE: a autora (2021)

O CIF apresentou as mesmas características dos solos anteriores, acompanhando a radiação solar. Não houve chuvas durante esse ciclo.

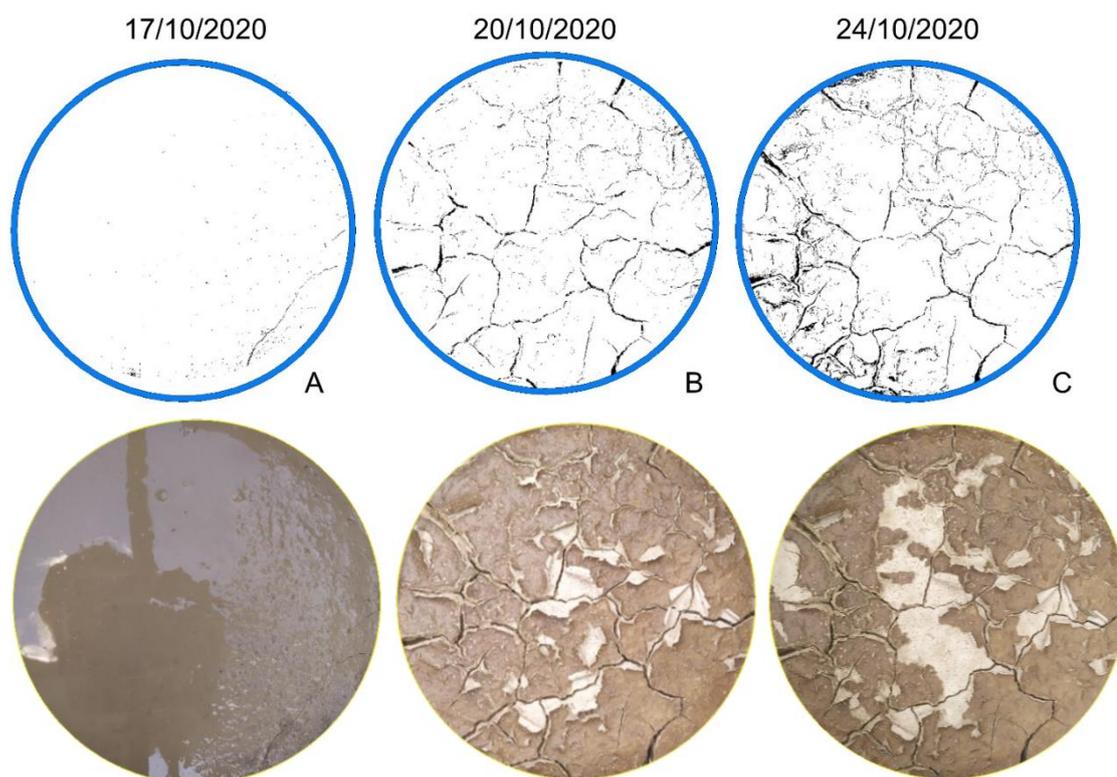
FIGURA 34 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 4, SOLO B



FONTE: a autora (2021)

Durante o período de fissuração, uma camada fina de solo escamou e foi se soltando da amostra com o tempo, formando na FIGURA 35 – B uma sombra próximo às fissuras. Esse ciclo apresentou um acréscimo de 5,714% nas fissuras. Esse valor fica bem perceptível ao analisar a FIGURA 35.

FIGURA 35 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS CICLO 4, SOLO B



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.2.3 Ciclo final – Ciclo 8

O último ciclo do solo B foi antecedido por uma chuva de 25,2 mm. As primeiras fissuras se desenvolveram no dia 22 de novembro e seguiram até o dia 27 de novembro, com duração total do ciclo de 6 dias, como mostra a TABELA 11.

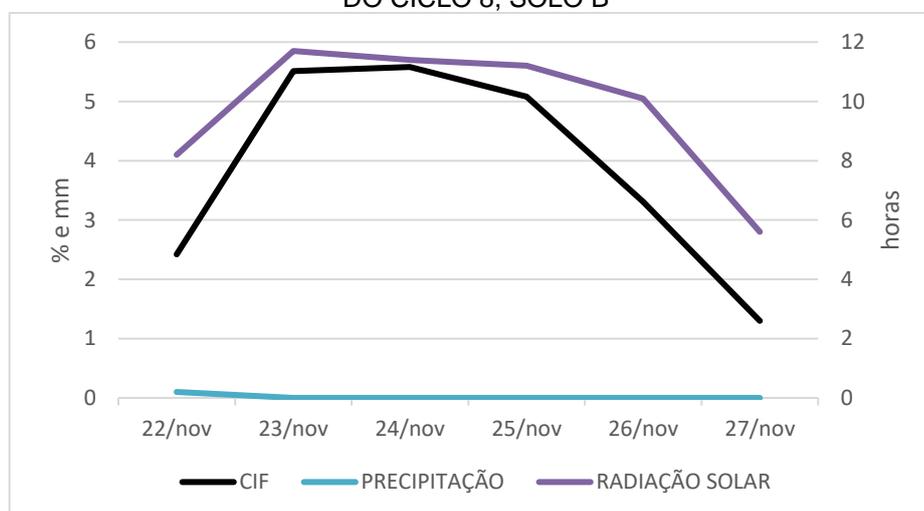
TABELA 11 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 8, SOLO B

Data de início	22/11/2020
Data de término	27/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	25,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	58,2
Radiação solar média diária (h)	9,70

FONTE: a autora (2021)

No primeiro dia do ciclo o solo recebeu uma chuva quase que insignificante de 0,1 mm, não prejudicando o desenvolvimento das fissuras. A radiação solar se manteve semelhante à incidente sobre os outros solos.

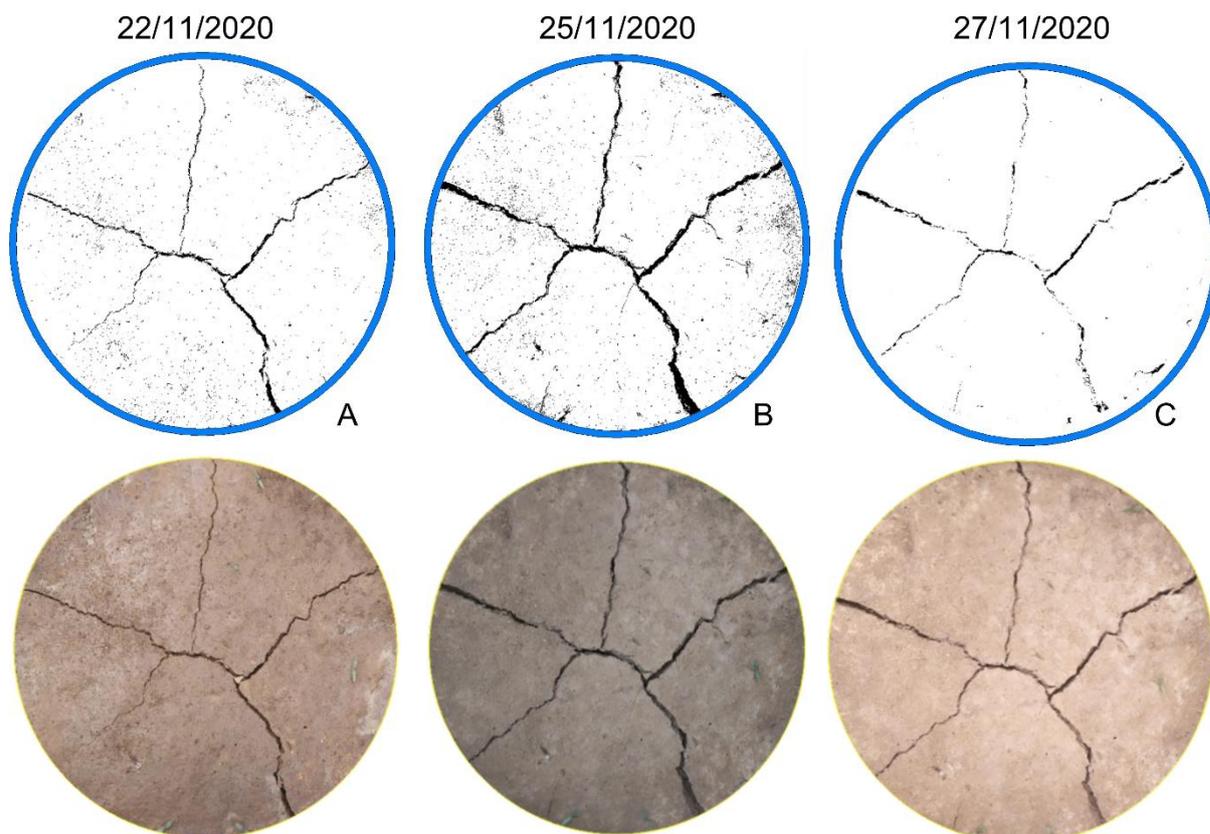
FIGURA 36 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 8, SOLO B



FONTE: a autora (2021)

O desenvolvimento das fissuras visto na FIGURA 37 mostra menores quantidades de fissuras desenvolvidas, mas com dimensões maiores. Na FIGURA 37 - C devido a abertura elevada, o sol iluminou o fundo das fissuras, diminuindo o valor real do CIF.

FIGURA 37 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO B, CICLO 8



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.3 Solo C

##### 4.1.3.1 Ciclo inicial – Ciclo 1

O ciclo 1 teve início no dia 22 de agosto e foi finalizado no dia 26 de setembro, totalizando 36 dias corridos, como mostra a TABELA 12.

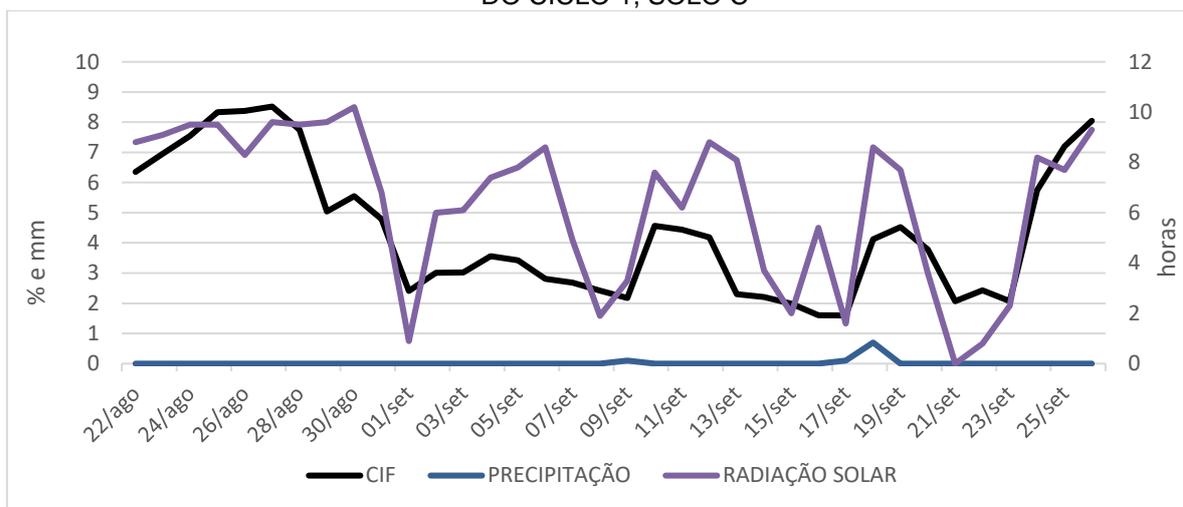
TABELA 12 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 1, SOLO C

Data de início	22/08/2020
Data de término	26/09/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	0
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,9
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	220,6
Radiação solar média diária (h)	6,13

FONTE: a autora (2021)

O padrão de fissuração para este primeiro ciclo segue o mesmo que dos solos A e B, como mostra a FIGURA 38, onde o CIF acompanha os valores de radiação solar. Nos dias 09/09/2020, 16/09/2020 e 17/09/2020 o CIF diminui, decorrente da água da chuva, aumentando logo após.

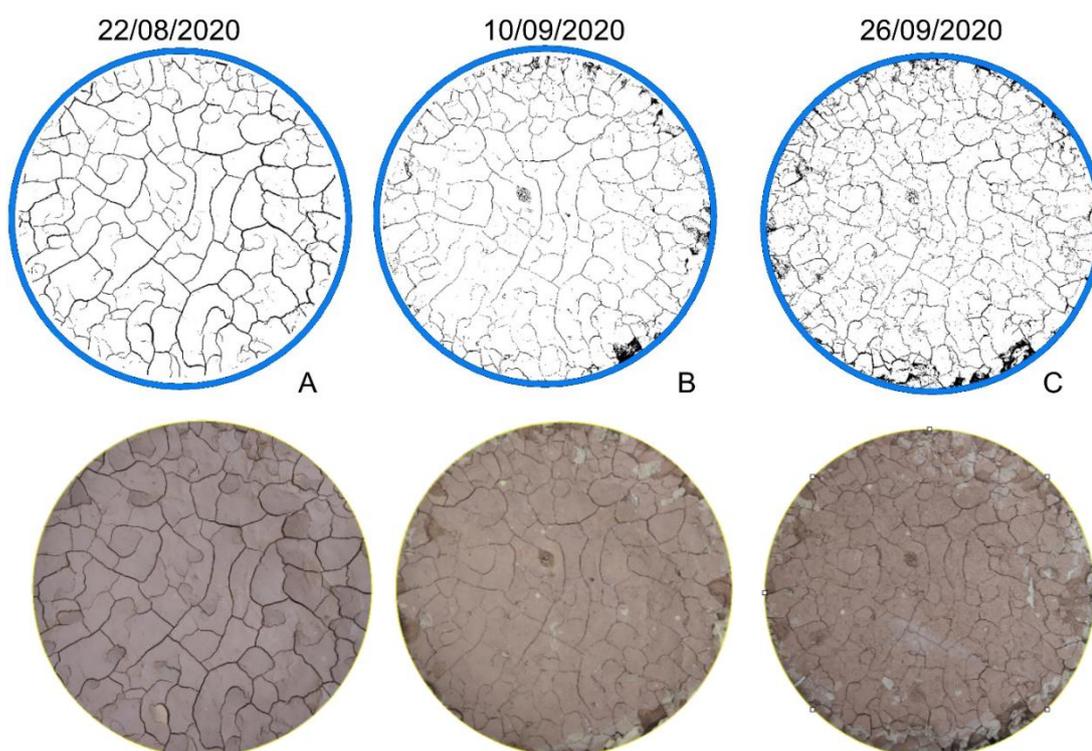
FIGURA 38 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 1, SOLO C



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 39 mostra que no dia 22 de agosto, primeiro dia do ciclo elas estavam mais definidas que no restante dos dias. O dia 10 de setembro (FIGURA 39 – B) mostra uma superfície com um CIF menor, resultado da baixa radiação solar recebida. A última imagem do ciclo mostra fissura menos vivas e em maiores quantidade.

FIGURA 39 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO C, CICLO 1



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.3.2 Ciclo intermediário – Ciclo 6

O sexto ciclo do solo C começou no dia 01 de outubro e recebeu 22,6mm de chuva antes de seu início, que se finalizou no dia 10 de outubro. O ciclo total teve 10 dias e contou com uma chuva significativa de 6 mm, como mostra a TABELA 13.

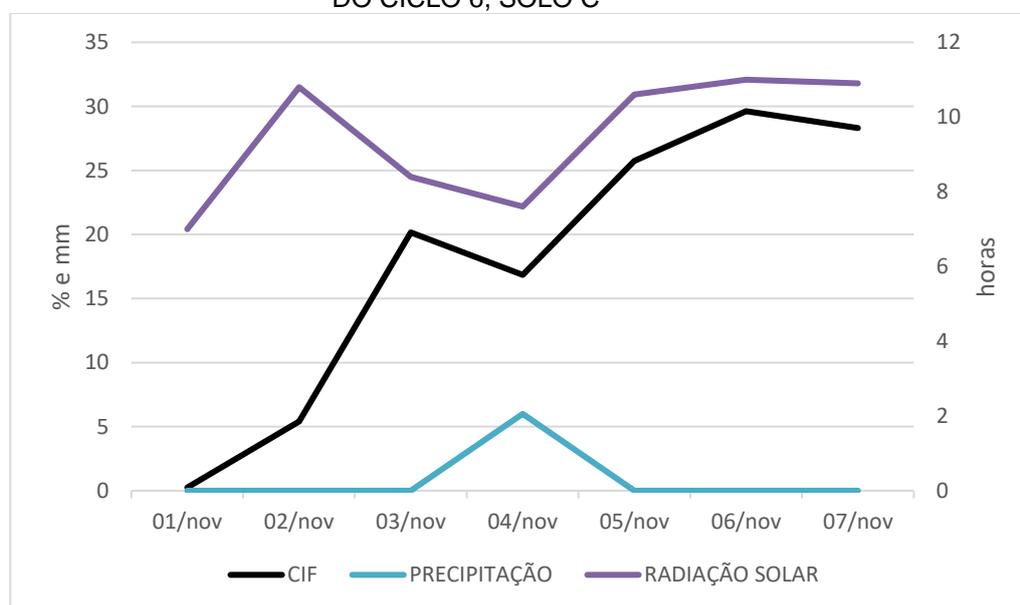
TABELA 13 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 6, SOLO C

Data de início	01/11/2020
Data de término	10/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	77,5
Radiação solar média diária (h)	7,75

FONTE: a autora (2021)

O CIF mostrado no gráfico da FIGURA 40 após a chuva recebida no dia 4 de novembro caminha quase paralelamente a radiação solar. Esse padrão está presente em todos os solos.

FIGURA 40 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 6, SOLO C

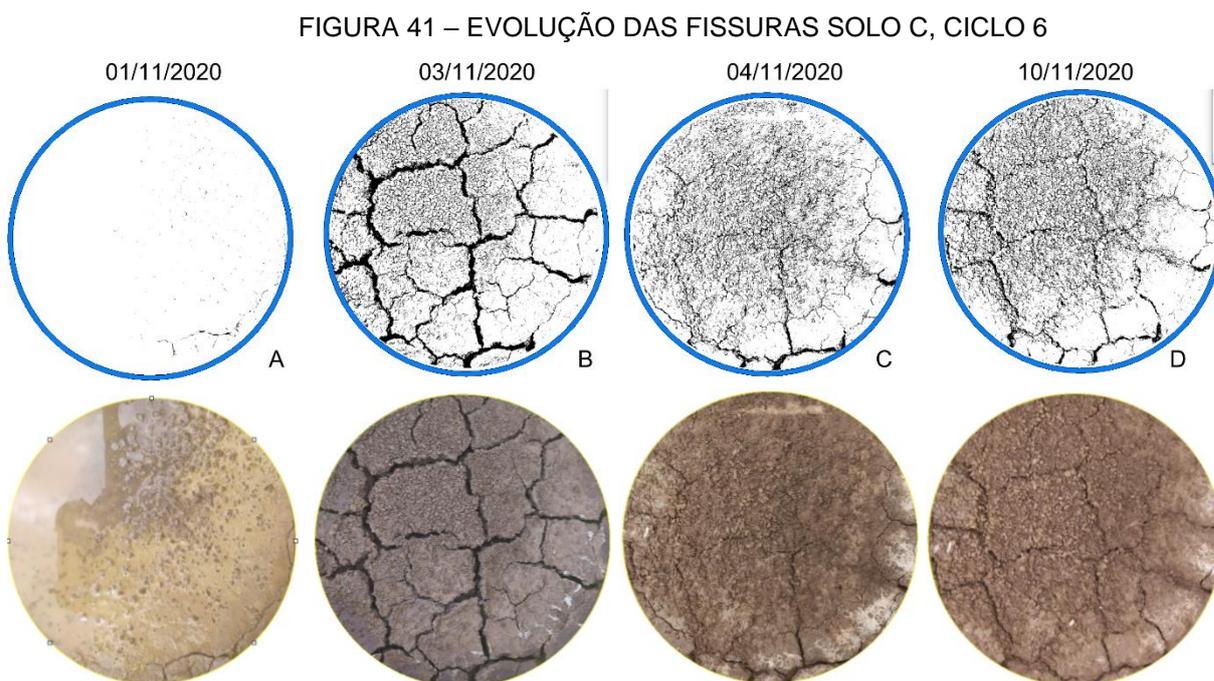


FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 41 mostra os 4 estágios principais desse ciclo, assim como no ciclo 4 do solo A. O primeiro (FIGURA 41 – A) é o início do processo, com uma pequena fissura que segue crescendo na lateral.

A imagem do dia 03 de novembro mostra como as fissuras estavam antes da chuva e em seguida no dia 04 de novembro como as fissuras ficaram. Pode se observar que suas dimensões diminuem (FIGURA 41 – B e C).

No último dia do ciclo as fissuras aumentaram em relação ao dia 04 de novembro, mas não superaram as encontradas antes do período de chuva (FIGURA 41 – D).



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.3.3 Ciclo final – Ciclo 8

O último ciclo do solo C foi antecedido por uma chuva de 25,2 mm. As primeiras fissuras se desenvolveram no dia 22 de novembro e seguiram até o dia 27 de novembro, com duração total do ciclo de 7 dias, como mostra a TABELA 15.

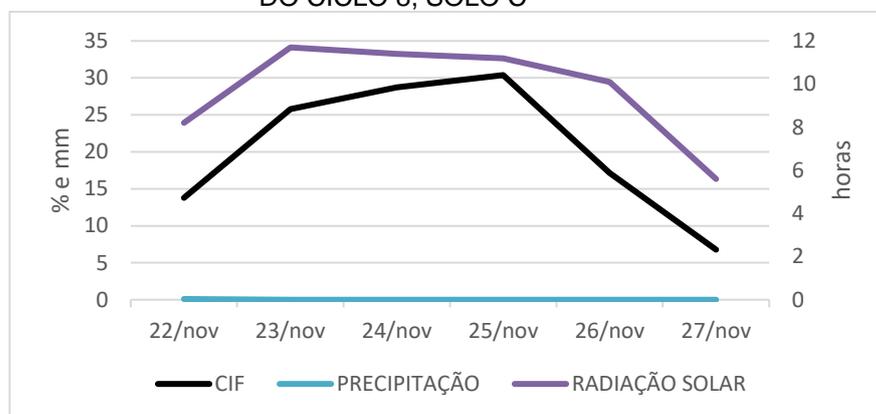
TABELA 14 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 8, SOLO C

Data de início	22/11/2020
Data de término	27/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	25,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	58,2
Radiação solar média diária (h)	9,70

FONTE: a autora (2021)

O solo recebeu uma chuva de 0,1 mm (FIGURA 42) no primeiro dia de ciclo, que não alterou o padrão percebido nos outros solos.

FIGURA 42– GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 8, SOLO C

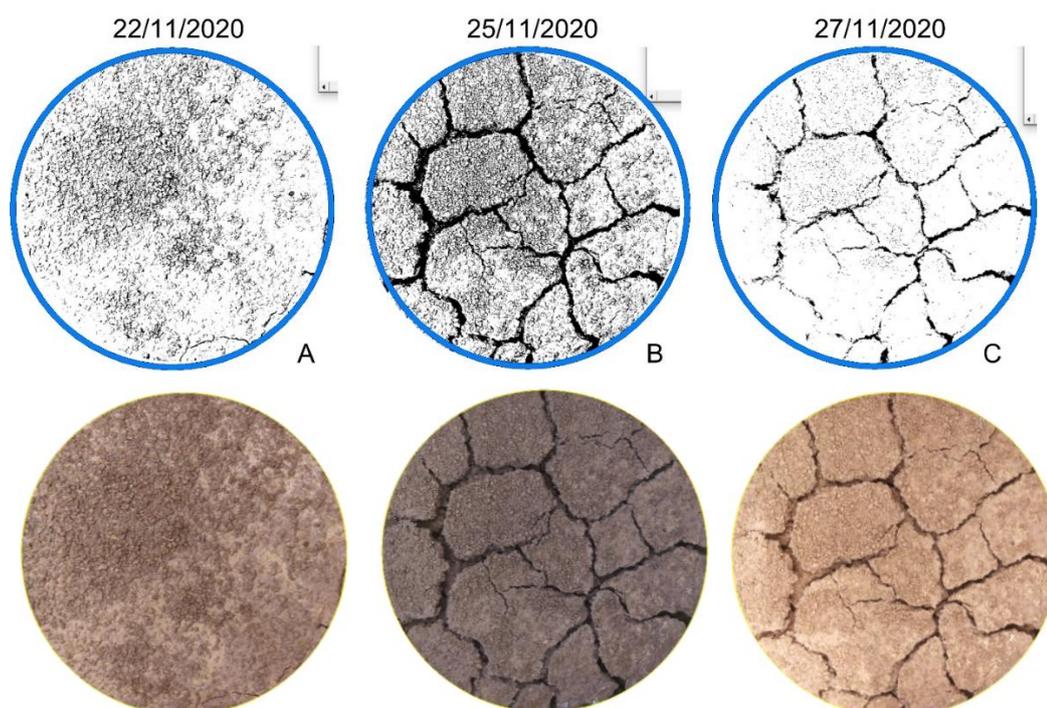


FONTE: a autora (2021)

Pela FIGURA 43 é possível visualizar o motivo dos valores do CIF serem elevados. As partículas de solos que se desprenderam pela chuva ficaram na superfície e interferiram no processamento das imagens, criando manchas escuras onde não há fissuras.

Mesmo com o processamento das imagens prejudicado é possível perceber as fissuras formadas, que tiveram durante todos os ciclos grandes dimensões.

FIGURA 43 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO C, CICLO 8



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.4 Solo D

##### 4.1.4.1 Ciclo inicial – Ciclo 1

O ciclo 1 teve início no dia 22 de agosto de foi finalizado no dia 27 de setembro, totalizando 37 dias corridos, como mostra a TABELA 15. O solo recebeu uma pequena quantidade de chuvas durante o período.

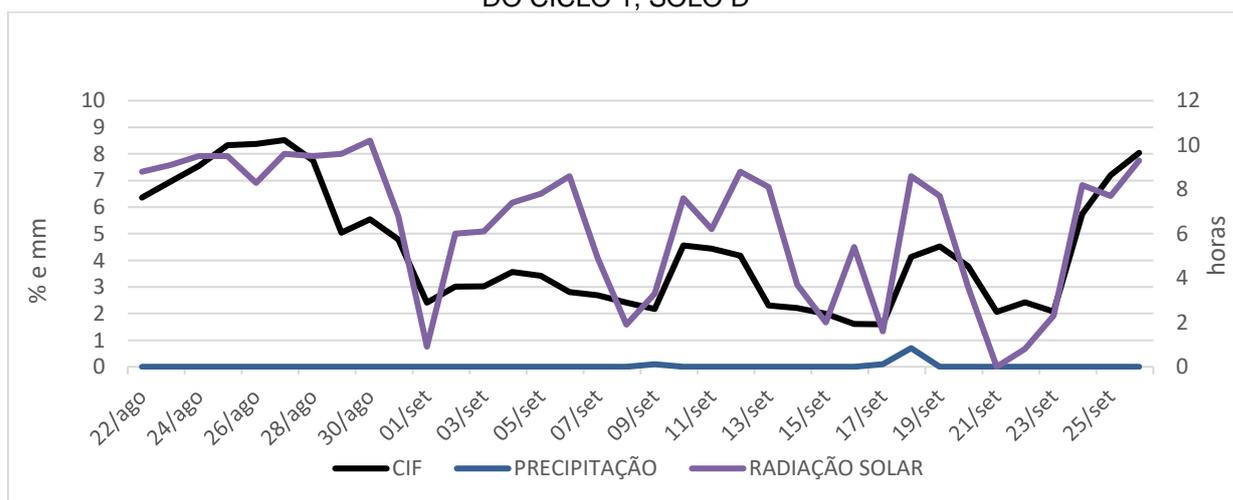
TABELA 15 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 1, SOLO D

Data de início	22/08/2020
Data de término	27/09/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	0
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,9
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	225,2
Radiação solar média diária (h)	6,09

FONTE: a autora (2021)

O padrão de fissuração para este primeiro ciclo segue o mesmo que dos solos anteriores, como mostra a FIGURA 44, onde o CIF acompanha os valores de radiação solar. Nos dias 09/09/2020, 16/09/2020 e 17/09/2020 o CIF diminuiu, decorrente da água da chuva, aumentando após interrupção da precipitação.

FIGURA 44 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 1, SOLO D

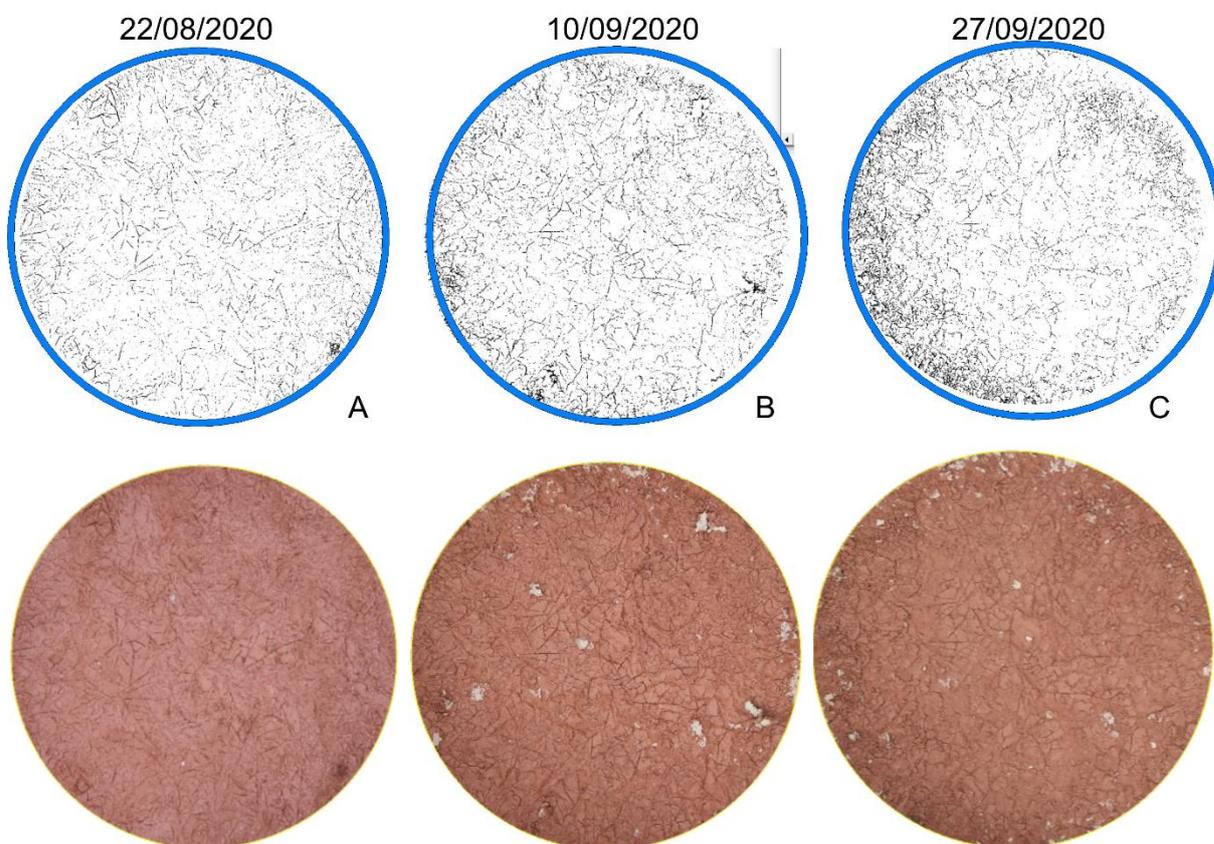


FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 45 mostra que o solo D possui características bem diferentes dos solos anteriores. Esse solo apresentou, durante o primeiro ciclo, diversas microfissuras em toda sua extensão. Elas se mantiveram desde o início (FIGURA 45 – A)

até o último dia do ciclo (FIGURA 45 – C), alterando somente suas dimensões conforme a variação da radiação solar.

FIGURA 45 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO D, CICLO 1



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.4.2 Ciclo intermediário – Ciclo 5

O quinto ciclo do solo D foi breve, iniciando no dia 26 de outubro e durando apenas dois dias (TABELA 16).

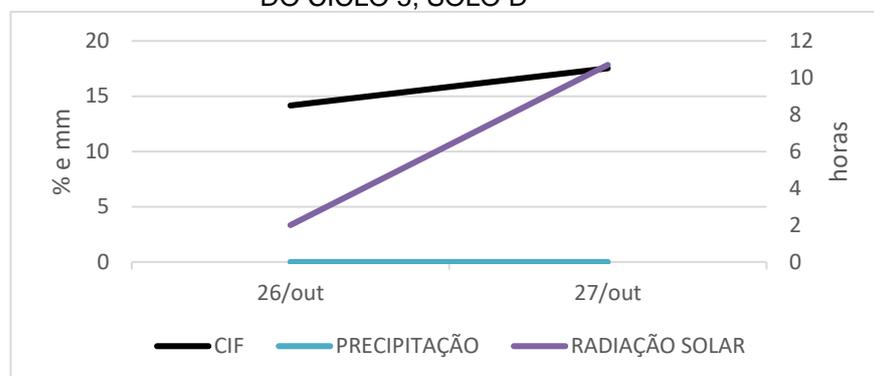
TABELA 16 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 5, SOLO D

Data de início	26/10/2020
Data de término	27/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	12,7
Radiação solar média diária (h)	6,35

FONTE: a autora (2021)

O gráfico da FIGURA 46 mostra valores de CIF e de radiação solar crescentes ao longo dos dois dias, sem o surgimento de chuvas.

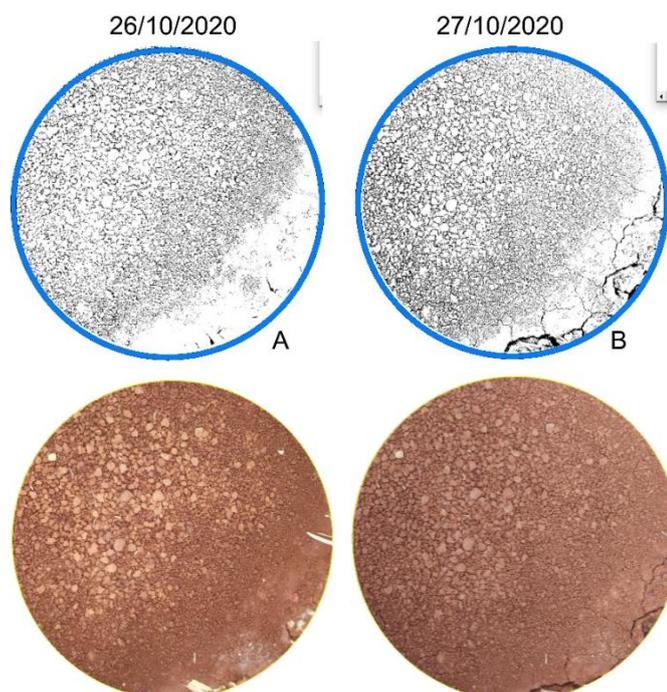
FIGURA 46– GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 5, SOLO D



FONTE: a autora (2021)

Pela FIGURA 47 é possível verificar o mesmo fenômeno ocorrido em relação ao solo C: as partículas soltas elevaram os valores encontrados na fissuração. A melhor maneira de encontrar o valor do CIF para este caso é subtrair os valores, assim terá somente o acréscimo das fissuras provocados pela radiação solar, que foi de 3,37%. As fissuras ficaram concentradas na lateral direita, pois o recipiente contendo as amostras apresentou uma pequena inclinação.

FIGURA 47 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO D, CICLO 5



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.4.3 Ciclo final – Ciclo 7

O último ciclo do solo D foi o sétimo tendo, portanto, um ciclo a menos que os demais. O ciclo se iniciou no dia 20 de novembro e foi encerrado no dia 25 de novembro, contando com 6 dias (TABELA 17).

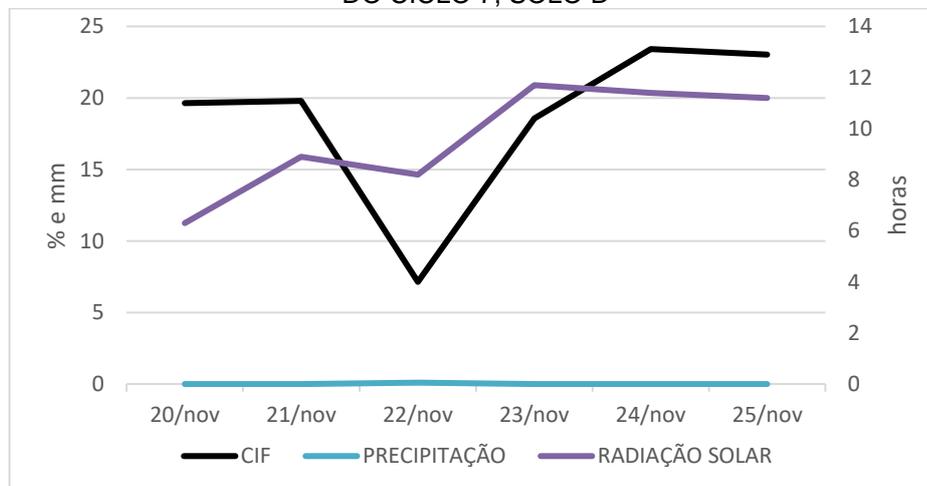
TABELA 17 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 7, SOLO D

Data de início	20/11/2020
Data de término	25/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	57,7
Radiação solar média diária (h)	9,62

FONTE: a autora (2021)

O solo não recebeu precipitação (FIGURA 48), e seguiu o mesmo padrão já citado, onde o CIF acompanha a variação da radiação solar durante o ciclo.

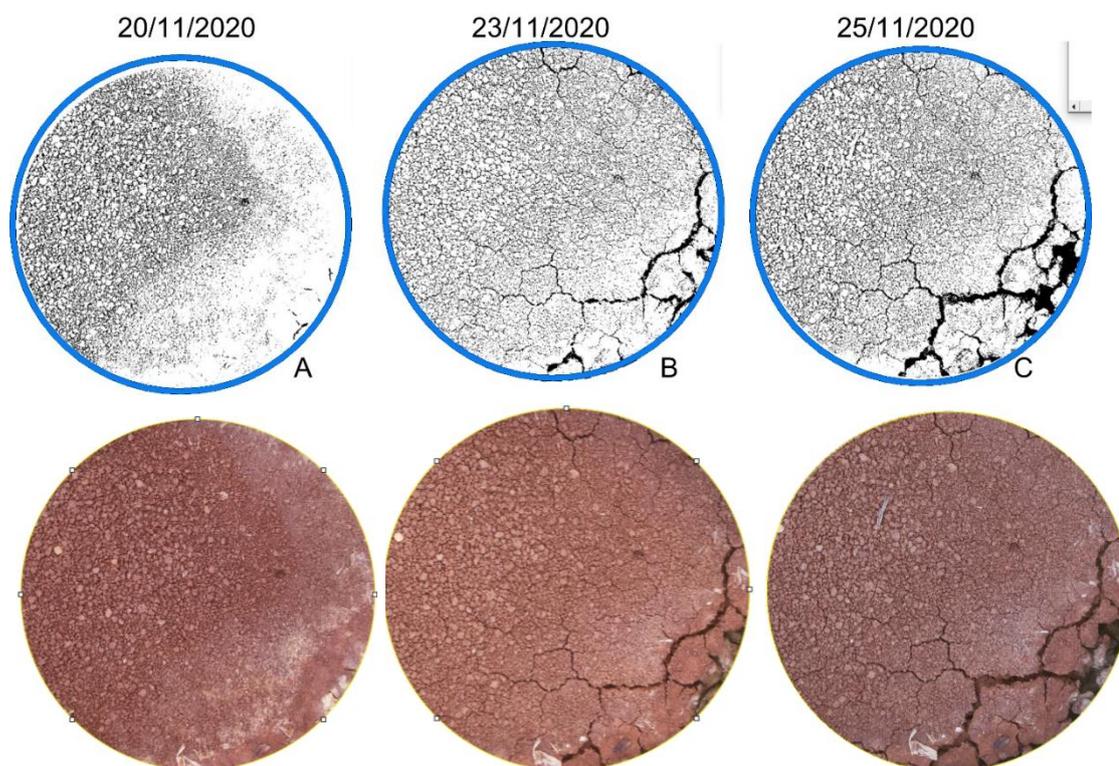
FIGURA 48– GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 7, SOLO D



FONTE: a autora (2021)

Analisando a FIGURA 49 – B e C é possível visualizar um aumento significativo nas fissuras na lateral direita, onde o último dia do ciclo apresenta as maiores fissuras encontradas na análise. Novamente o CIF foi prejudicado pelas partículas soltas que formam as manchas vistas na FIGURA 49.

FIGURA 49 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO D, CICLO 7



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.5 Solo E

##### 4.1.5.1 Ciclo inicial – Ciclo 1

O ciclo 1 teve início no dia 22 de agosto e foi finalizado no dia 27 de setembro, totalizando 37 dias corridos, como mostra a TABELA 18. Recebeu uma pequena quantidade de chuvas durante o período. Condições estas que são vistas na maioria dos solos já citados

TABELA 18 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 1, SOLO E

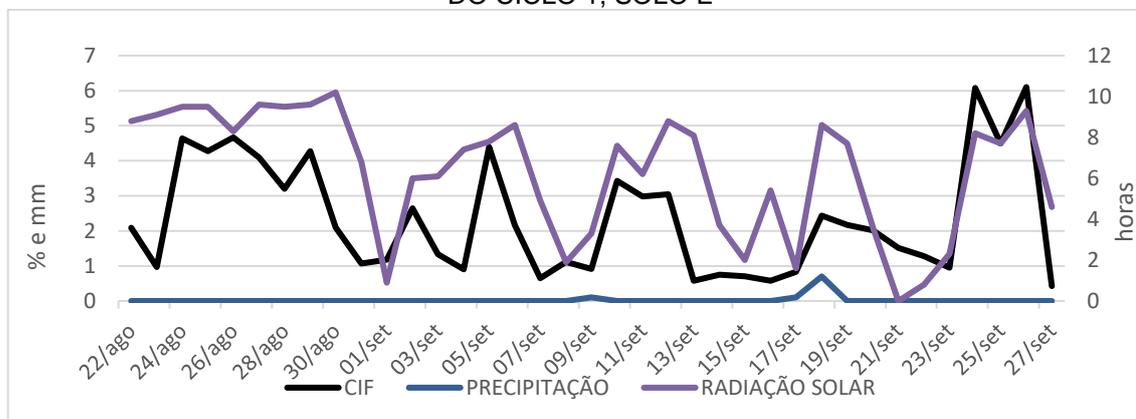
Data de início	22/08/2020
Data de término	27/09/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	0
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,9
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	225,2
Radiação solar média diária (h)	6,09

FONTE: a autora (2021)

Os primeiros dias do processo de fissuração passaram por valores anormais, mas estabilizam-se a partir do dia 4 de agosto (FIGURA 50) e seguem o padrão já

observado. Nos dias 09/09/2020, 16/09/2020 e 17/09/2020 o CIF diminuiu, decorrente da água da chuva e aumentando logo após.

FIGURA 50 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 1, SOLO E



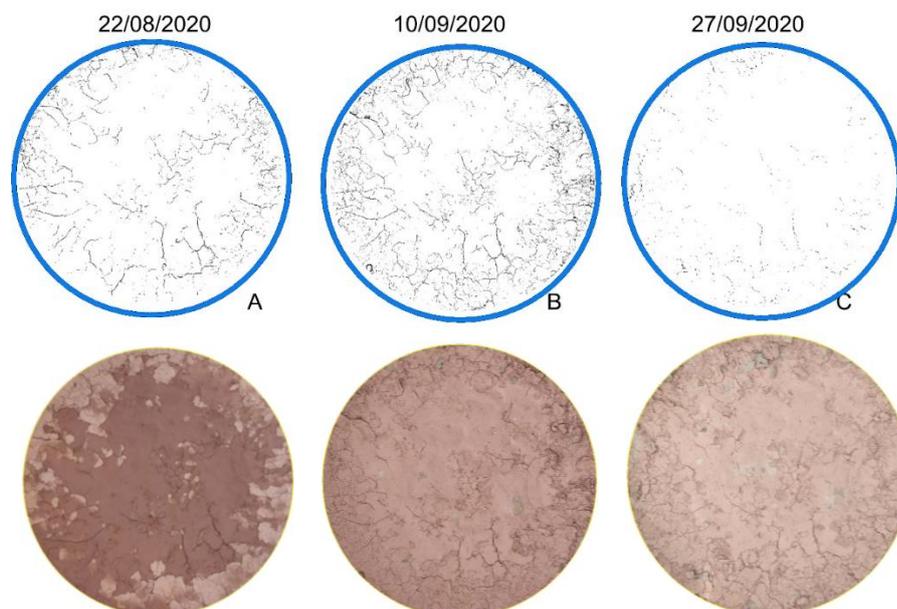
FONTE: a autora (2021)

Na FIGURA 50 são mostrados 3 estágios de fissuração para o primeiro ciclo do solo E.

O dia 10 de setembro (FIGURA 51 – B) ocorreu um dia após o solo receber 0,1 mm de água, formando então fissuras maiores, provocadas por rápida retirada da água adicionada.

A FIGURA 51 – C mostra o último dia do ciclo, que teve uma queda dos valores de radiação e consequentemente das fissuras.

FIGURA 51 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO E, CICLO 1



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.5.2 Ciclo intermediário – Ciclo 6

O sexto ciclo foi iniciado no dia 02 de novembro, durando 9 dias, sendo assim finalizou no dia 10 de novembro. Este ciclo recebeu antes de seu início 22,6 mm de água (TABELA 19).

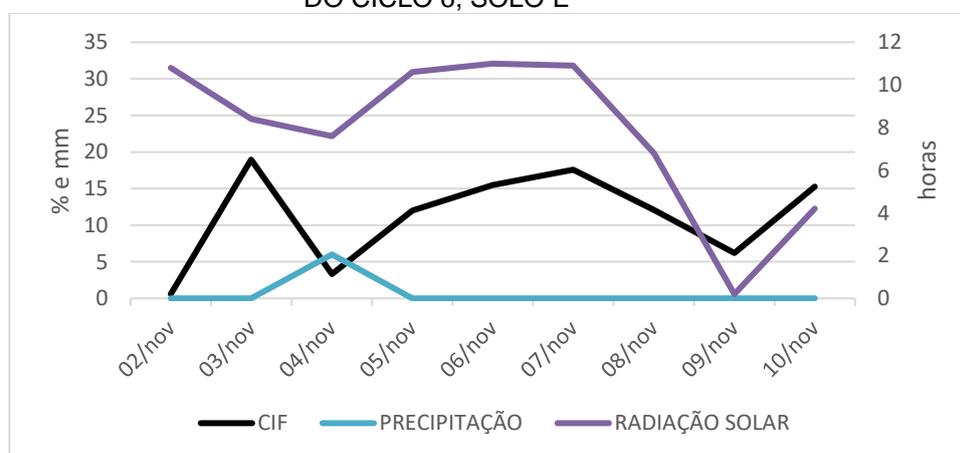
TABELA 19 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 6, SOLO E

Data de início	02/11/2020
Data de término	10/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	70,5
Radiação solar média diária (h)	7,05

FONTE: a autora (2021)

O gráfico da FIGURA 52 mostra valores de CIF e de radiação solar caminhando juntos. Este ciclo teve uma chuva de 6 mm no dia 04 de novembro, que ocasionou uma queda brusca no gráfico do CIF.

FIGURA 52– GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 6, SOLO E



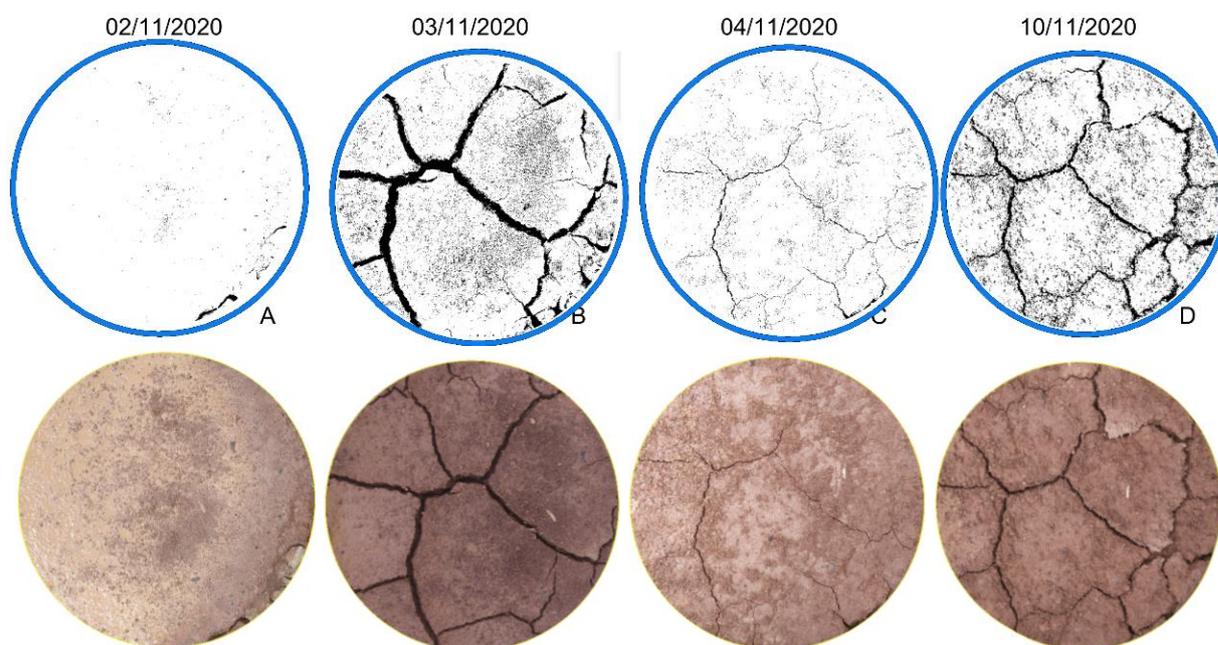
FONTE: a autora (2021)

A evolução das fissuras é nítida na FIGURA 53. No primeiro momento apenas uma pequena fissura é vista na parte inferior e com apenas um dia de diferença o solo evolui para várias fissuras com dimensões consideráveis (FIGURA 53 – B).

Logo após receber a chuva de 6 mm, o solo diminuiu a maior parte de suas fissuras (FIGURA 53 – C), ficando somente sua geometria. As fissuras seguiram evoluindo até o dia 10 de novembro (FIGURA 53 – D), último dia do ciclo que

apresenta um aumento no valor do CIF mas não superando o valor encontrado antes de receber água.

FIGURA 53 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO E, CICLO 6



FONTE: a autora (2021)

#### 4.1.5.3 Ciclo final – Ciclo 8

Este ciclo iniciou no dia 21 de novembro e foi encerrado no dia 26 de novembro, contando com 7 dias (TABELA 20).

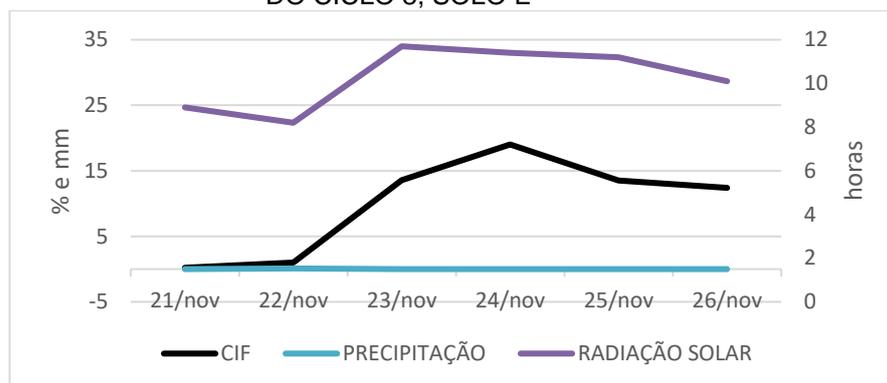
TABELA 20 – INFORMAÇÕES GERAIS CICLO 8, SOLO E

Data de início	21/11/2020
Data de término	26/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	25,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0,1
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	61,5
Radiação solar média diária (h)	10,25

FONTE: a autora (2021)

O solo não recebeu precipitação (FIGURA 54) e seguiu o mesmo padrão já citado, onde o CIF acompanha a variação da radiação solar durante o ciclo.

FIGURA 54 – GRÁFICO CORRELACIONANDO CIF, PRECIPITAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR DO CICLO 8, SOLO E

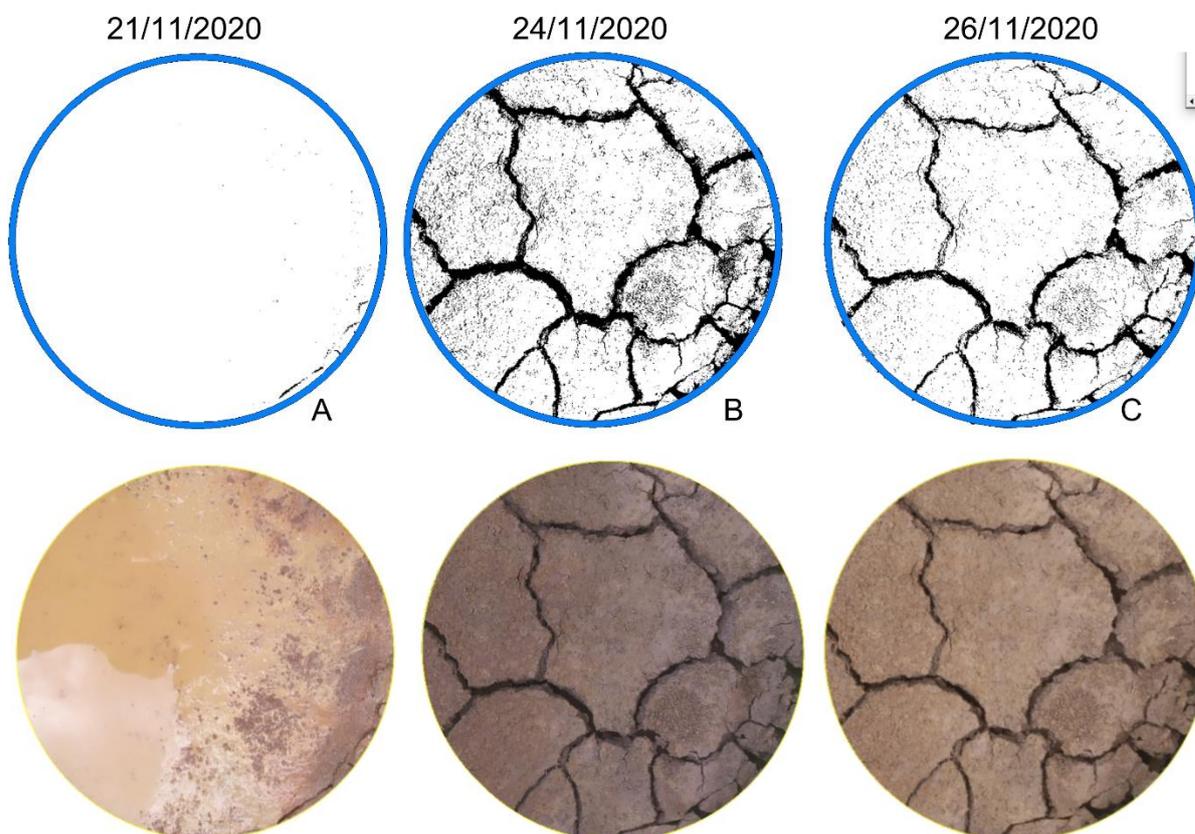


FONTE: a autora (2021)

Analisando a FIGURA 55 – A e B é possível visualizar um aumento significativo nas fissuras que iniciam na lateral direita.

No dia 26 de novembro, solo apresentou uma queda de 6,62% no valor do CIF, devido a diminuição na radiação solar e também pela grande dimensão das fissuras, onde novamente a luz atingiu o final da fissura criando pixels brancos dentro das fissuras (FIGURA 55 – C).

FIGURA 55 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO E, CICLO 8



FONTE: a autora (2021)

## 4.2 SOLOS INTERNOS

Os solos internos tiveram um único ciclo, onde suas datas de início variaram de acordo com cada um. Para o processamento das imagens, o recorte utilizado para seccionar uma área de interesse foi o mesmo dos solos expostos.

Esse grupo de solos não recebeu a impermeabilização com a bentonita, pois não se possuía a intenção de ter contato com a chuva e nem com a radiação solar. Desta forma, permaneceram o tempo todo em local seco e coberto, evitando o contato com essas variáveis.

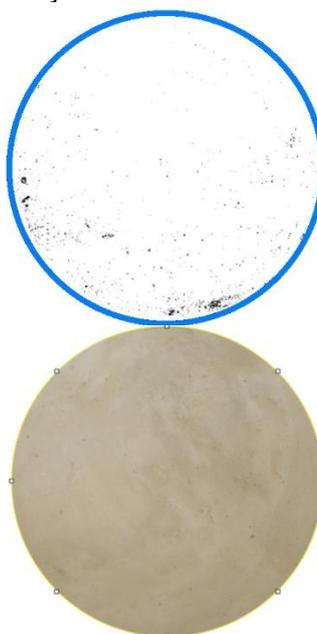
Todos os solos apresentaram o descolamento das laterais, consideradas a condição de contorno do experimento.

### 4.2.1 Solo A

O solo A durante todo o período de análise não apresentou nenhuma fissura, apenas teve suas laterais descoladas. O início da exposição foi no dia 21 de agosto e as análises finalizaram no dia 27 de novembro, sendo assim o ciclo teve duração de 68 dias.

A FIGURA 56 representa a condição final em que o solo esteve, apresentando somente algumas manchas causadas pela ondulação da superfície.

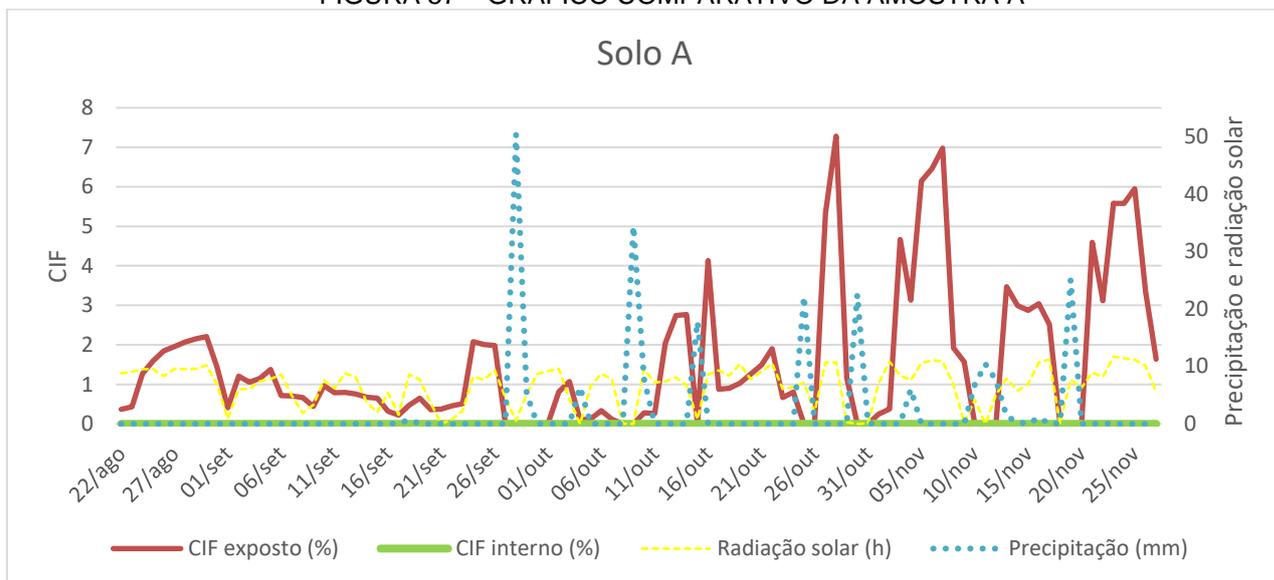
FIGURA 56 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO A, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 57 faz uma comparação da amostra A interna com a externa ao decorrer de todo período de monitoramento, evidenciando a diferença da área fissurada nas duas situações.

FIGURA 57 – GRÁFICO COMPARATIVO DA AMOSTRA A

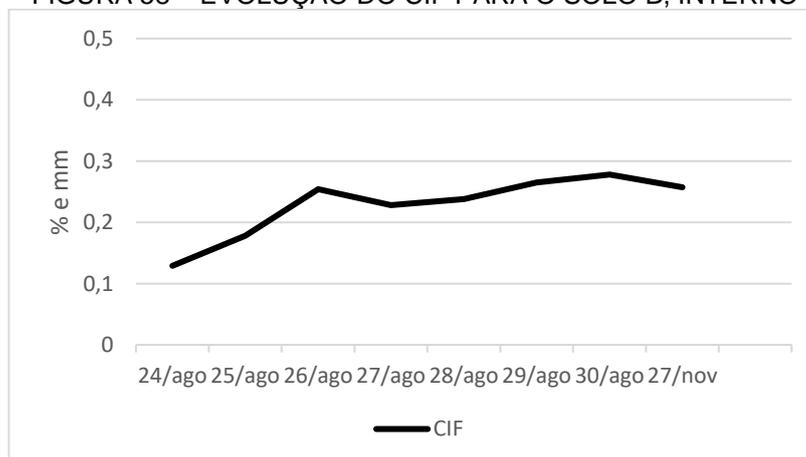


FONTE: a autora (2021)

#### 4.2.2 Solo B

O solo B teve início da sua fissuração no dia 24 de agosto, totalizando um ciclo de 65 dias, que finalizou no dia 27 de novembro. A FIGURA 58 mostra o andamento das fissuras ao longo de alguns dias. A valor final encontrado para o CIF foi de 0,257%, mostrando uma fissuração extremamente baixa.

FIGURA 58 – EVOLUÇÃO DO CIF PARA O SOLO B, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

Pela FIGURA 59 é possível perceber apenas uma micro fissura na parte inferior a direita, essa é a imagem do dia 27 de novembro, último dia do ciclo.

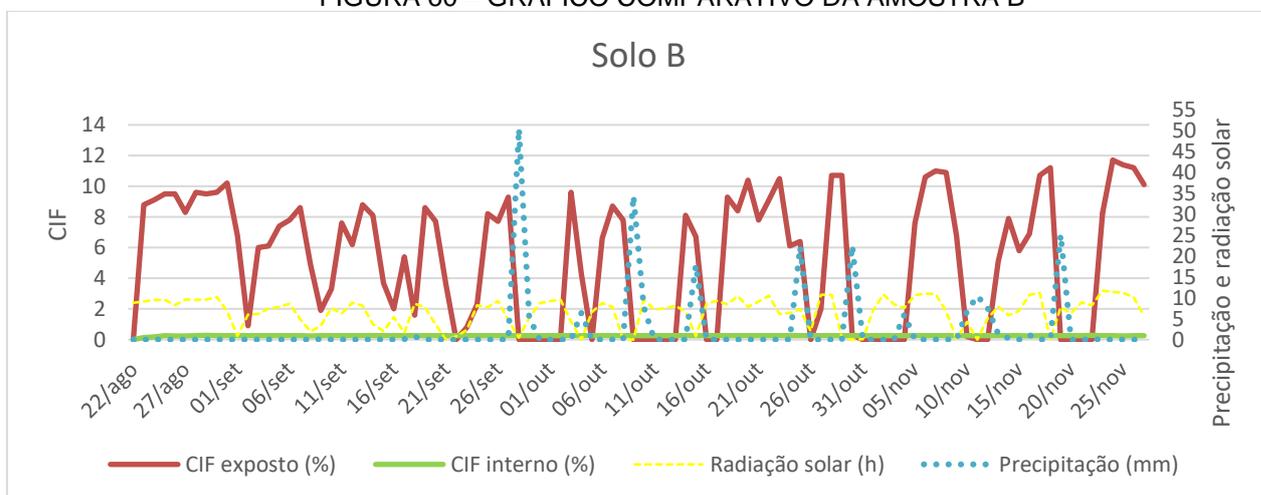
FIGURA 59 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO B, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 60 faz uma comparação da amostra B interna com a externa ao decorrer de todo período de monitoramento, evidenciando a diferença da área fissurada nas duas situações.

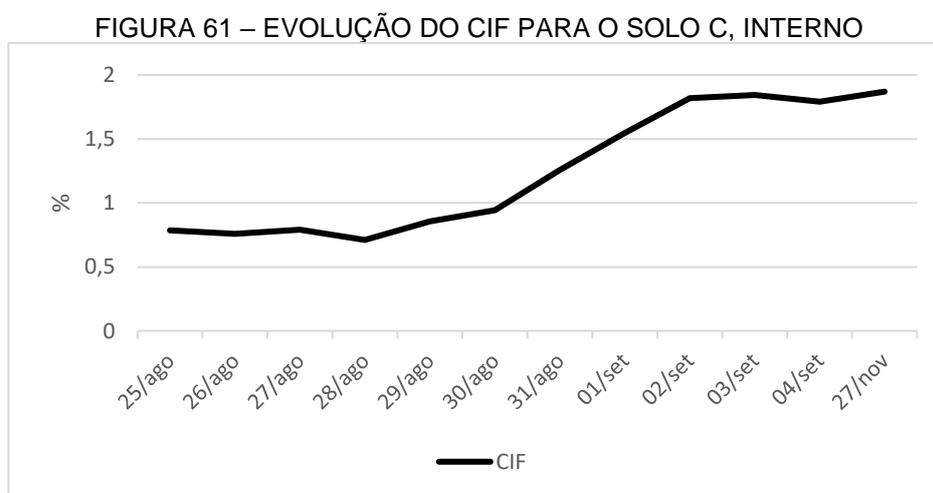
FIGURA 60 – GRÁFICO COMPARATIVO DA AMOSTRA B



FONTE: a autora (2021)

### 4.2.3 Solo C

O solo C iniciou seu processo de fissuração no dia 25 de agosto e a análise foi concluída no dia 27 de novembro, totalizando 64 dias. Esse solo se manteve estável durante os primeiros dias. No dia 31 de agosto teve um aumento das fissuras e novamente no dia 02 de setembro estabilizou-se, contando com um CIF de 1,87% no seu último dia (FIGURA 61).

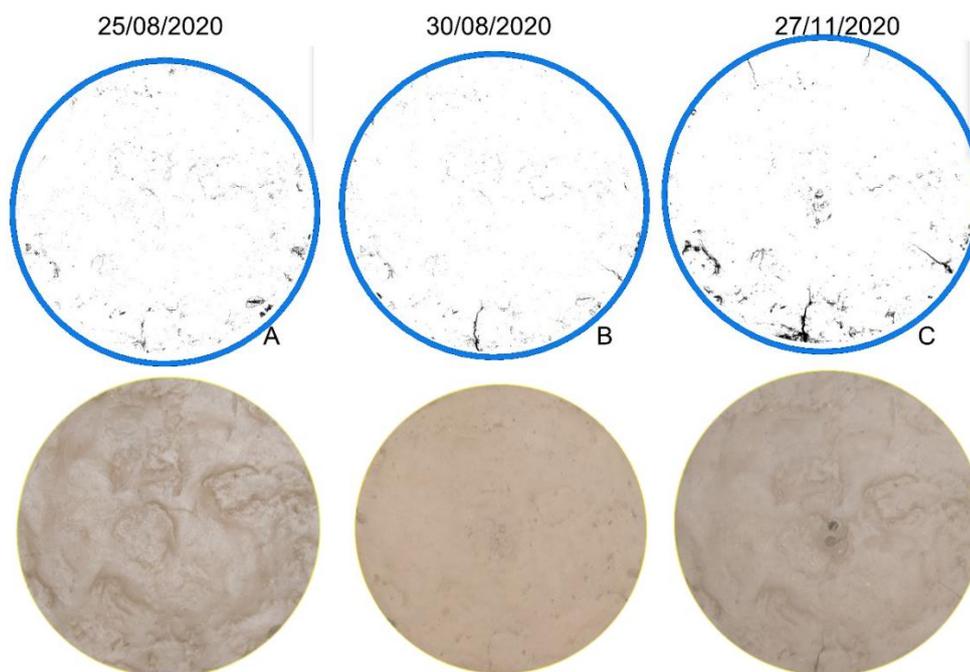


FONTE: a autora (2021)

O processo de fissuração iniciou com uma pequena fissura na parte inferior (FIGURA 62 – A) que ganhou força ao decorrer do ciclo e finalizou como a maior desse solo.

Outras fissuras apareceram nas extremidades como é possível verificar no dia 27 de novembro (FIGURA 62 – C).

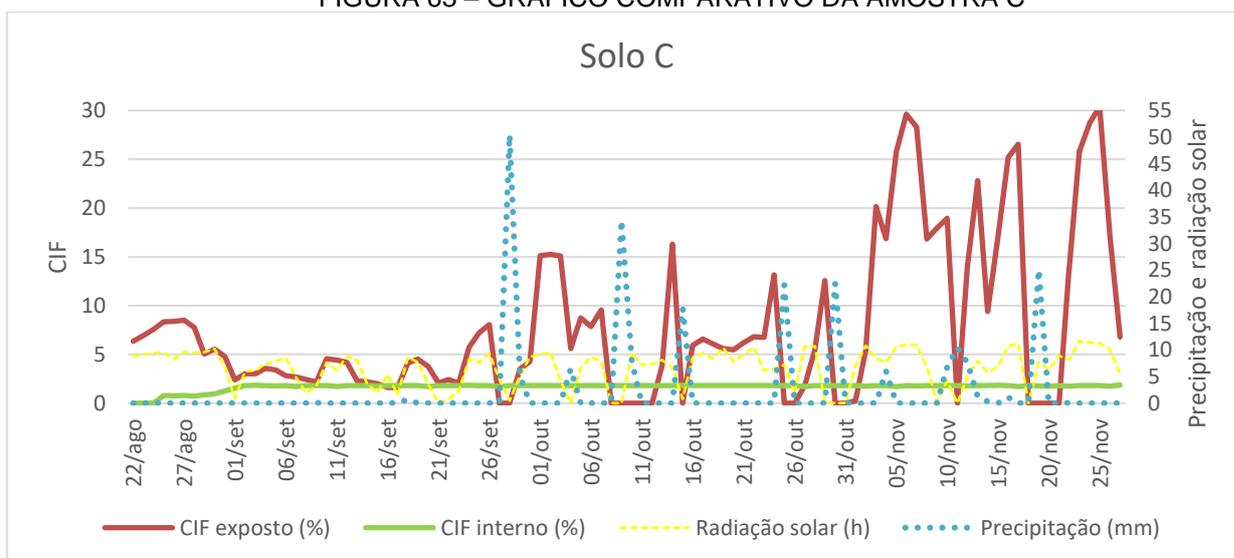
FIGURA 62 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO C, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 63 faz uma comparação da amostra C interna com a externa ao decorrer de todo período de monitoramento, evidenciando a diferença da área fissurada nas duas situações.

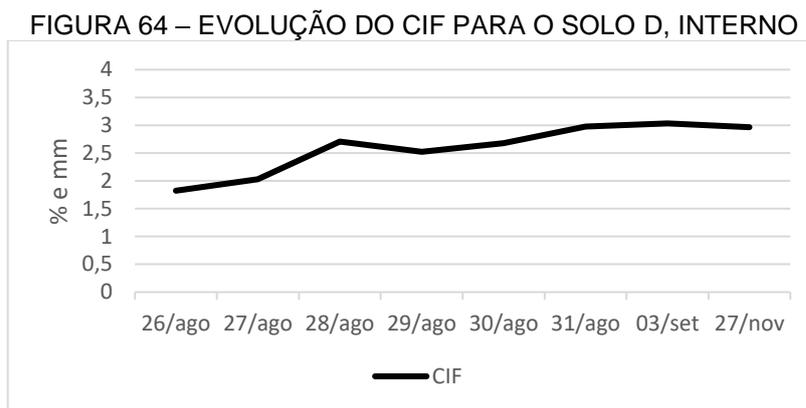
FIGURA 63 – GRÁFICO COMPARATIVO DA AMOSTRA C



FONTE: a autora (2021)

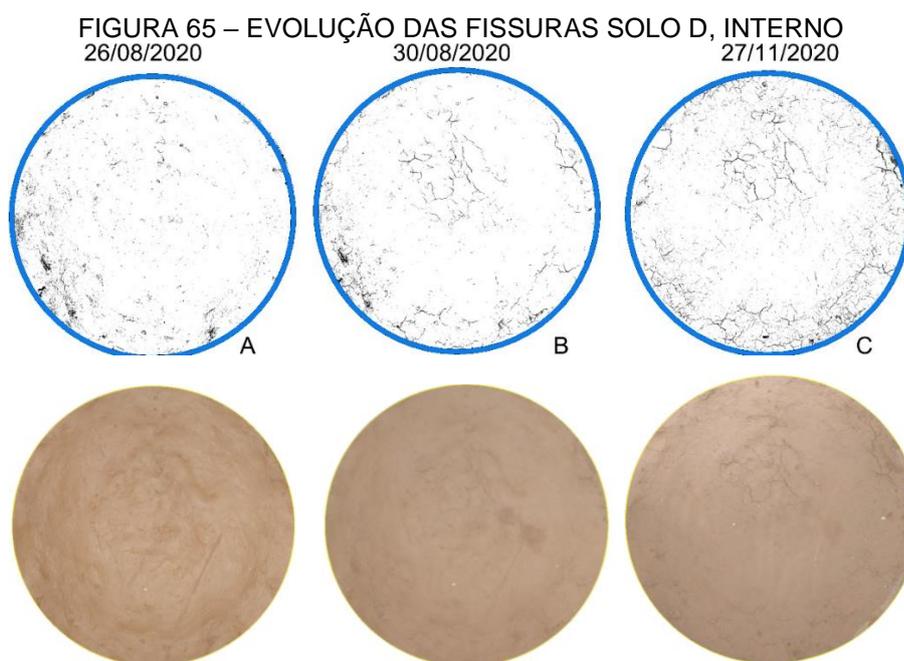
#### 4.2.4 Solo D

O período de fissuração para o solo D foi do dia 26 de agosto até o dia 27 de novembro, somando 63 dias de análise. O solo obteve o valor total de 2,96% de área fissurada, com valores crescentes até o dia 28 de agosto. Logo em seguida teve um decréscimo e manteve sua estabilidade nos próximos dias.



FONTE: a autora (2021)

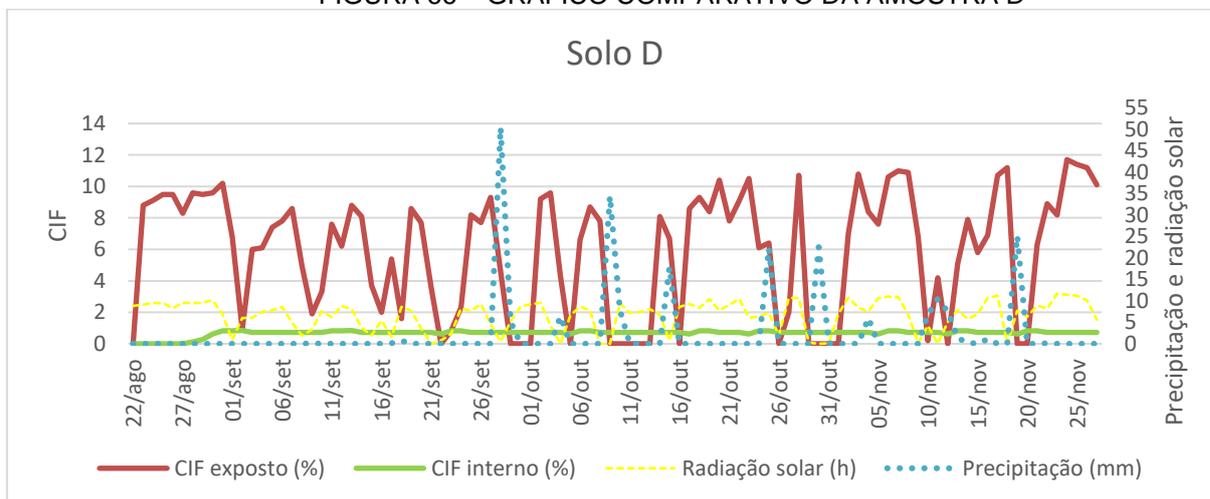
O solo D teve várias micro fissuras durante o processo de formação (FIGURA 65), apresentando o mesmo comportamento inicial de seu par exposto às variáveis do clima, mas com uma intensidade muito menor. Sua condição final (FIGURA 65 – C) apresentou as mesmas características das fissuras anteriores (FIGURA 65 – B).



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 66 faz uma comparação da amostra C interna com a externa ao decorrer de todo período de monitoramento, evidenciando a diferença da área fissurada nas duas situações.

FIGURA 66 – GRÁFICO COMPARATIVO DA AMOSTRA D

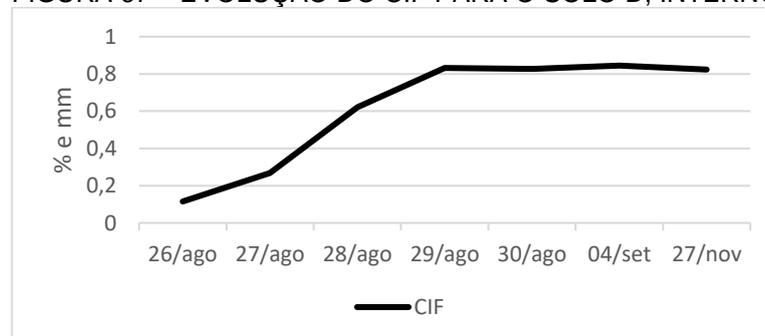


FONTE: a autora (2021)

#### 4.2.5 Solo E

O solo E teve o mesmo tempo de fissuração do solo D, com 63 dias, iniciando no dia 26 de agosto e terminando no dia 27 de novembro. Teve um valor total do CIF de 0,873%, com uma curva crescente até o dia 29 de março, onde se estabilizou e seguiu até o dia 27 de novembro.

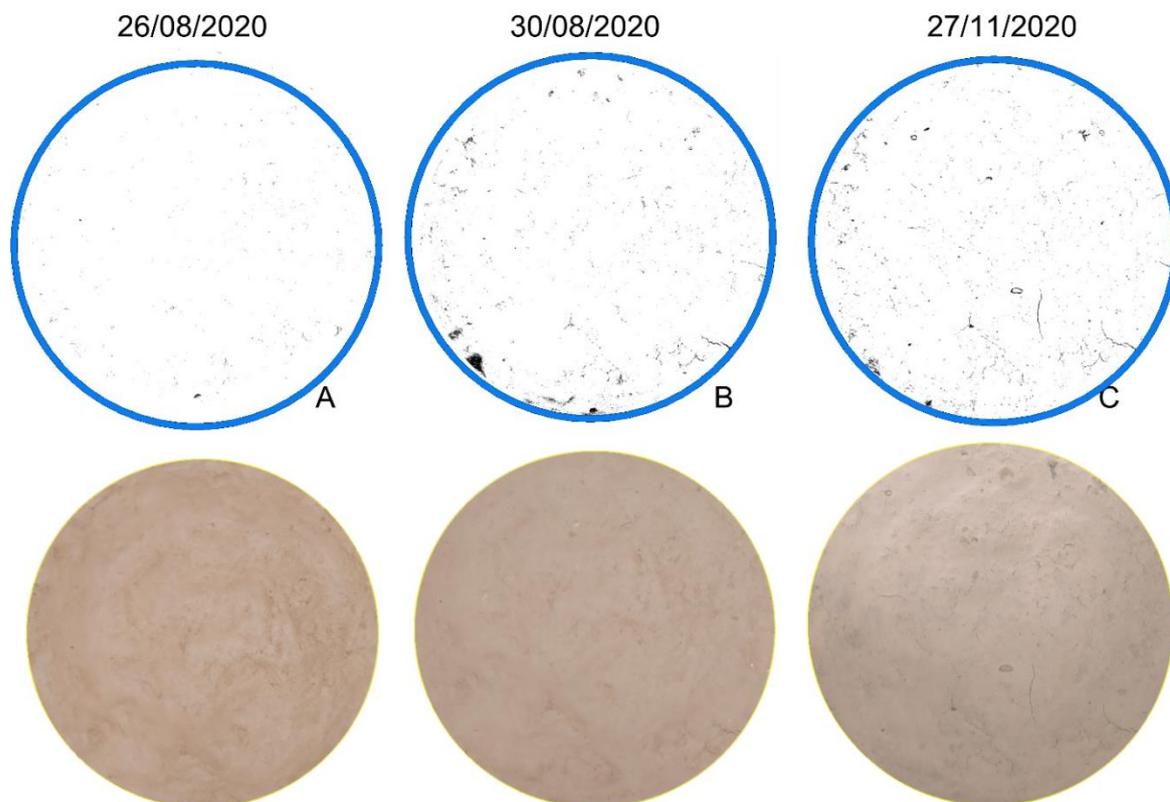
FIGURA 67 – EVOLUÇÃO DO CIF PARA O SOLO D, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

Como mostra a FIGURA 68 o processo de fissuração contou com algumas pequenas fissuras espelhadas ao longo da superfície do solo, sendo a mais significativa na parte inferior a direita.

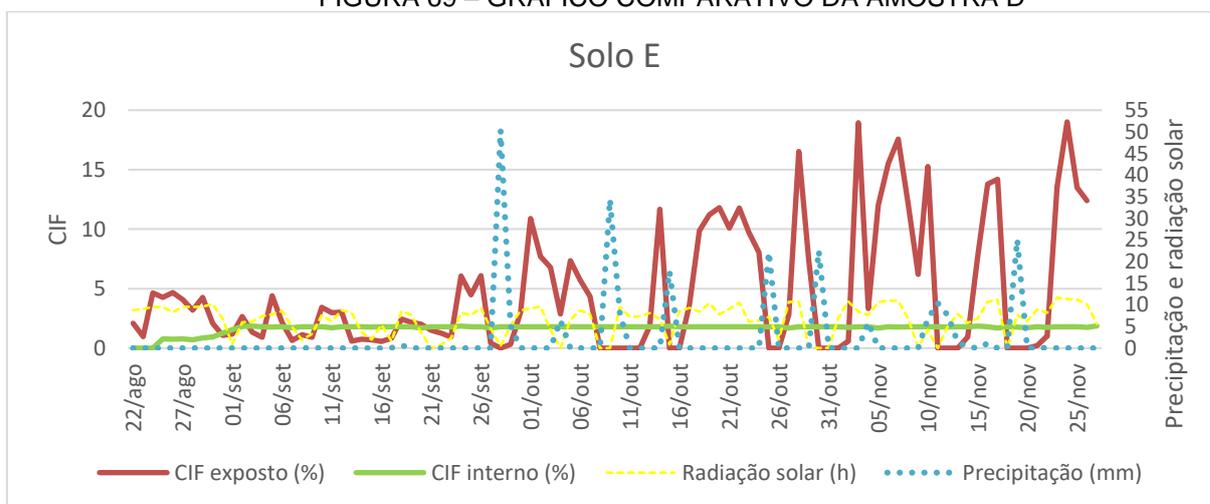
FIGURA 68 – EVOLUÇÃO DAS FISSURAS SOLO E, INTERNO



FONTE: a autora (2021)

A FIGURA 69 faz uma comparação da amostra C interna com a externa ao decorrer de todo período de monitoramento, evidenciando a diferença da área fissurada nas duas situações.

FIGURA 69 – GRÁFICO COMPARATIVO DA AMOSTRA D



FONTE: a autora (2021)

## 5 CONCLUSÕES

Os solos expostos apresentaram o mesmo comportamento perante as variáveis a que foram submetidos.

Os valores do CIF e da radiação solar caminhavam sempre de forma semelhante. Quando os valores de radiação solar aumentavam, o CIF também aumentava, mostrando assim uma dependência do CIF em relação a radiação solar.

O mesmo foi visto na situação inversa, assim que os valores da radiação solar eram decrescidos, ocorria uma diminuição nos valores do CIF.

A precipitação também foi um fator importante, pois logo após o solo receber água sem desfazer as fissuras antigas, os valores para o CIF aumentavam de maneira mais rápida. Esse fato pode ser explicado pela FIGURA 07 que mostra como a área da superfície é ampliada com as fissuras, assim ocorre uma maior saída de água num período de tempo mais curto, aumentando a velocidade do processo de fissuração.

A afirmação feita por Tang et al (2011) de que os solos aumentam a capacidade de fissuração com os ciclos, foi confirmada durante o período de análise. Mesmo com ciclos desiguais, é possível perceber que nos últimos ciclos de cada solo, os valores obtidos para a taxa de fissuração foram maiores. Isso ocorre devido a muitos fatores, como a perda da resistência do solo e também devido às chuvas. As gotas de água caem com velocidade na superfície do solo e fazem com que as partículas antes compactadas se desprendam e apenas se depositem na superfície após a secagem, criando um maior espaçamento entre os grãos, do que quando submetidos a uma nova secagem. Desta forma, terão uma maior retração e, por consequência, uma maior fissuração.

Os solos que apresentaram maiores valores de fissuração nos dois casos, foram os que possuíam maiores porcentagens de material fino em sua composição e com maiores índices de plasticidade, como foi afirmado por Lakshmikanta (2009), já que esses solos possuem uma maior capacidade de reter água.

As amostras internas que não tiveram acesso a radiação solar e água não obtiveram grandes valores de CIF, comparados aos seus pares expostos ao clima. Conclui-se assim que tanto a radiação solar como as chuvas são fatores que ditam o surgimento e o comportamento das fissuras.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 6457: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 6457: **Grãos e solo que passam na peneira de 4,8mm.** Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 6457: **Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 7181/84: **Análise Granulométrica - Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 6459/84: **Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 7182: **Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos.** Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. **Soil structure: Evaluation and agricultural significance.** In: BAVAR, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R., eds. Soil physics. 4.ed. New York, J. Wiley, 1972. p.178-223.
- BOHN, S., PAUCHARD, L., & COUDER, Y. (2005). **Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. I. Temporal and geometrical hierarchy.** Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 1–8.
- BONDER, B. H. Dissertação de mestrado. **Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo.** São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- CAMAPUM, J. DE C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** p. 805, 2015.
- CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**, v. 1, p. 244, 1988.
- CHIOSSI, N. J. **Geologia Aplicada à Engenharia**, 1979.
- CORTE, A. E., & HIGASHI, A. (1964). **Experimental research on desiccation cracks in soils.** CRREL Research Report, 72.

COSTA, C. d. Tese de doutorado. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** Brasília, Distrito Federal, Brasil: Universidade de Brasília, 2015.

IBGE, I. B. DE G. A E E.-. **Manual Técnico de Pedologia 2ª edição.** [s.l: s.n.]. v. 5

LAKSHMIKANTA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils.** Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

LI, J. H., LI, L., CHEN, R., & LI, D. Q. (2016). **Cracking and vertical preferential flow through landfill clay liners.** *Engineering Geology*, 206, 33–41.

MACHADO, S. L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados.** 1998.

MARINHO, F. A. M. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** Texto (Livre-Docência). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S. L., & COLLE, S. (2005). **Mapas de Irradiação Solar para o Brasil - Resultados do Projeto SWERA.** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

MAZZA, C. A. da S. Tese de doutorado. **Caracterização ambiental da paisagem da microrregião colonial de Irati e zoneamento ambiental da floresta nacional de Irati, PR.** São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, 2006.

MENEZES, M. B. M. de. Dissertação de mestrado. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

NETO, O. de F. Dissertação de mestrado. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

PLANO DIRETOR MUNICIPAL **Mapa 3 - Geologia do Município Data 25 / 06 / 2010** Maxplan Planejamento, Arquitetura e Consultoria Ltda Responsável Técnico: Arq. José Vicente Socorro. (2010). 2010.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

QUEIROZ, J. E. R., GOMES, M. H., (2001). **Introdução ao Processamento Digital de Imagens.** Revista RITA: instruções para preparação de documentos em Word.

REIS, R. M. Tese de doutorado. **Caracterização ambiental da paisagem da microrregião colonial de Irati e zoneamento ambiental da floresta nacional de Irati, PR.** São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, 2006.

SILVA, I. M. P. Dissertação de mestrado. **Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaissé.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

SILVA, T. C. R. Dissertação de mestrado. Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissuras de solo expansivo do município de Bonito/PE. Recife: Universidade Federam de Pernambuco, 2019.

SILVA, T. J. L. d. Dissertação de mestrado. **Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica em aplicações de camada fina por meio de análise de imagens.** Brasília: Universidade de Brasília, 2017.

TANG, C. S., CUI, Y. J., SHI, B., TANG, A. M., & LIU C. (2011). **Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles.** Geoderma.

Tiba, C. (2000). **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres.** Atlas Solarimétrico Do Brasil, 1, 111. <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>

Toledo, M. C. M. de. (2005). **Tópico 7 - Intemperismo E Pedogênese.** 134–157.

## APÊNDICE A – SOLO A, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO

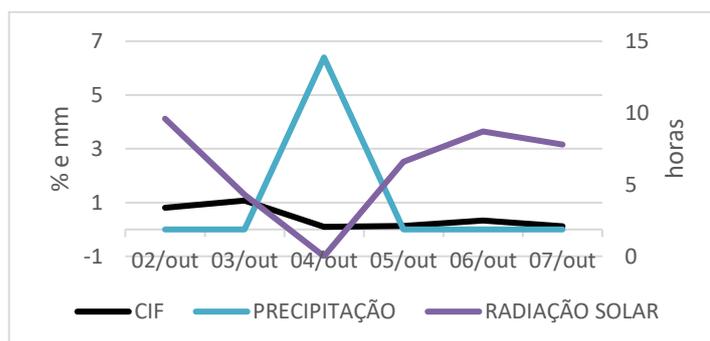
### A CICLO 2

A seguir tem-se a TABELA A.1 com as informações gerais sobre o ciclo 2 do solo A, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA A.1) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA A.2).

TABELA A.1 - Informações gerais.

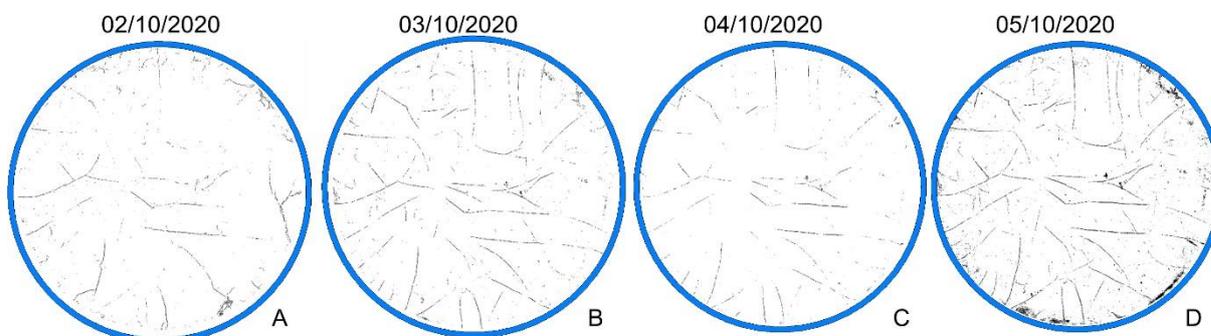
Data de início	02/10/2020
Data de término	07/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	55,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6,4
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	37
Radiação solar média diária (h)	6,17

FIGURA A.1 -Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA A.1 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

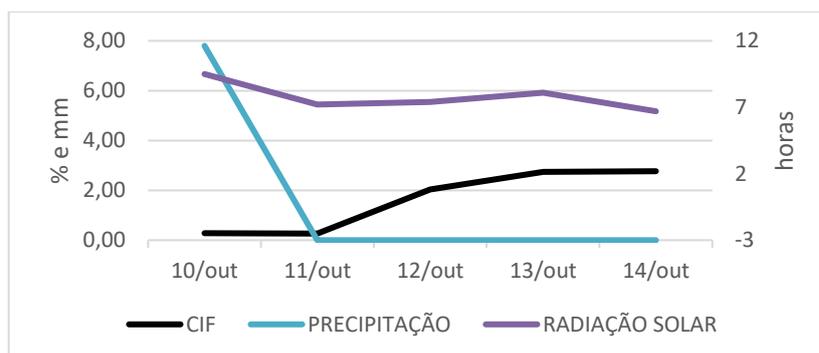
### A CICLO 3

A seguir tem-se a TABELA A.2 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo A, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA A.3) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA A.4).

TABELA A.2 - Informações gerais.

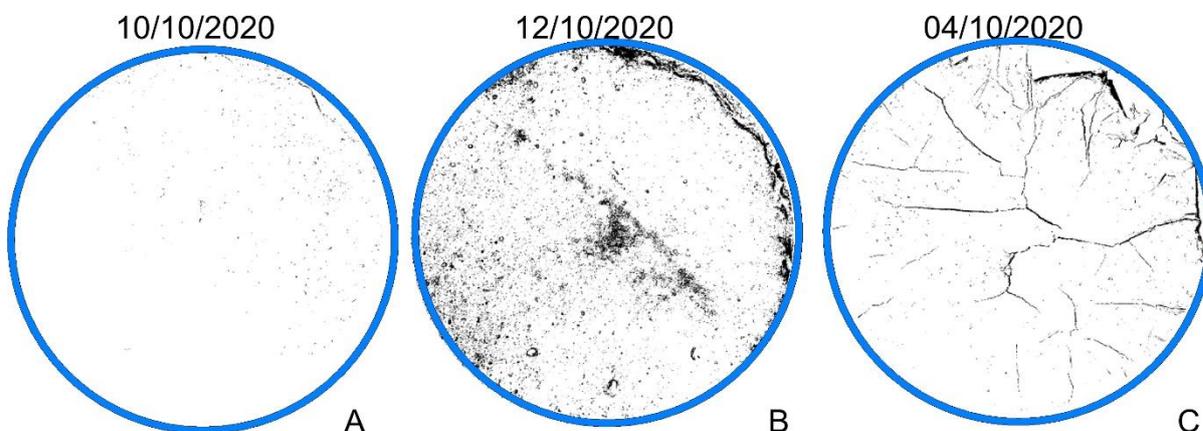
Data de início	10/10/2020
Data de término	14/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	34,4
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	7,8
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	38,9
Radiação solar média diária (h)	7,78

FIGURA A.3 -Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA A.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

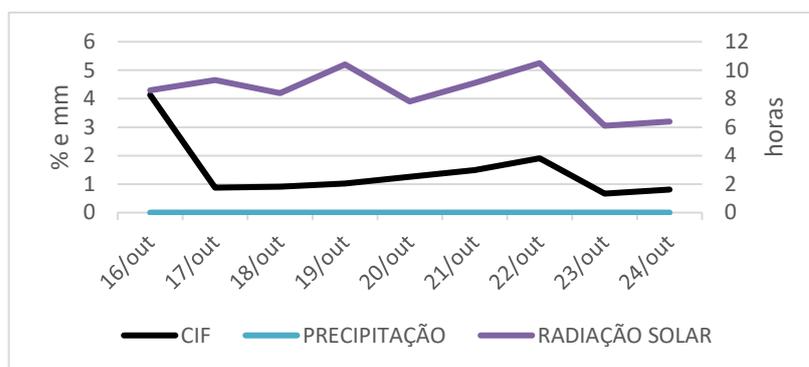
## A CICLO 4

A seguir tem-se a TABELA A.3 com as informações gerais sobre o ciclo 4 do solo A, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA A.5) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA A.6).

TABELA A.3 - Informações gerais.

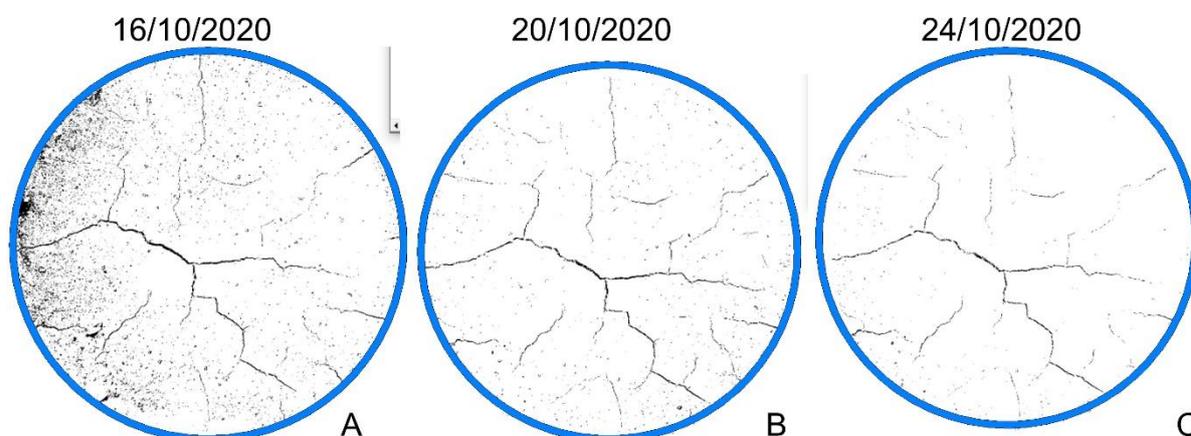
Data de início	16/10/2020
Data de término	24/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,8
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	76,6
Radiação solar média diária (h)	8,51

FIGURA A.5 -Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA A.6 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

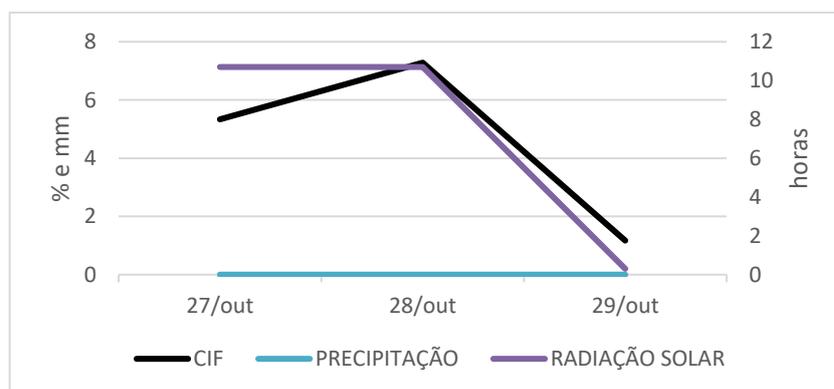
## A CICLO 5

A seguir tem-se a TABELA A.4 com as informações gerais sobre o ciclo 5 do solo A, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA A.7) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA A.8).

TABELA A.4 - Informações gerais.

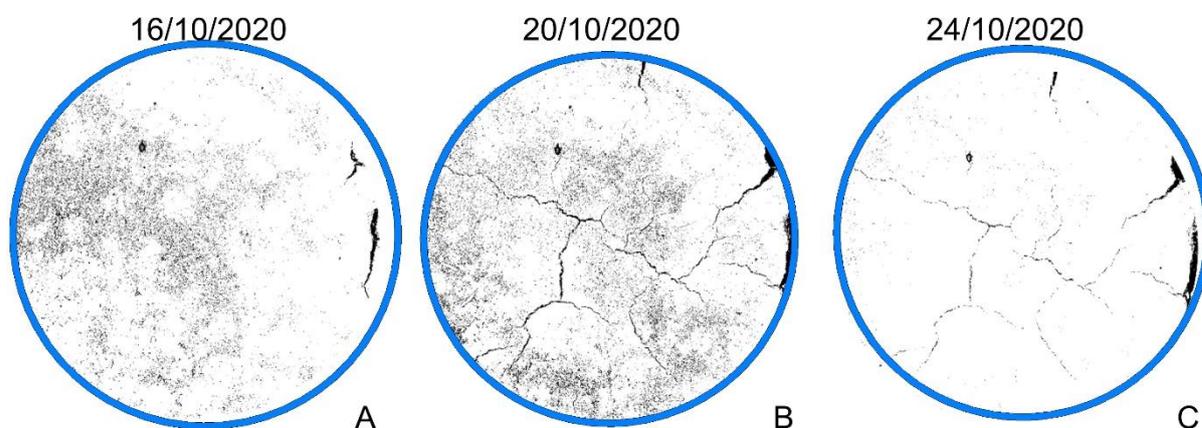
Data de início	27/10/2020
Data de término	29/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	21,7
Radiação solar média diária (h)	7,23

FIGURA A.7 -Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA A.8 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

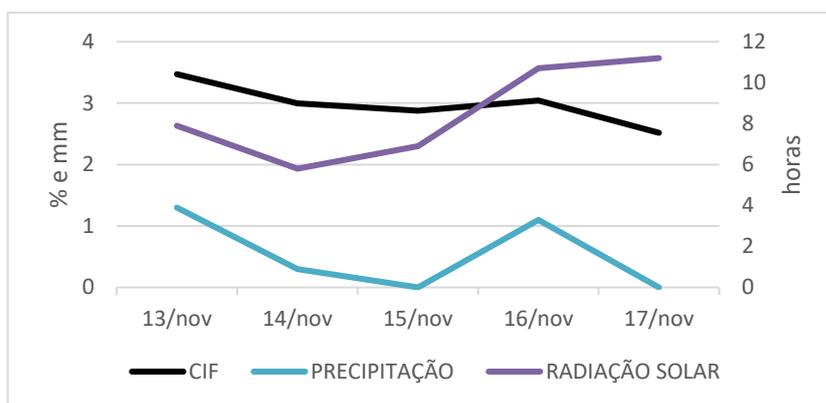
## A CICLO 7

A seguir tem-se a TABELA A.5 com as informações gerais sobre o ciclo 7 do solo A, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA A.9) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA A.10).

TABELA A.5 - Informações gerais.

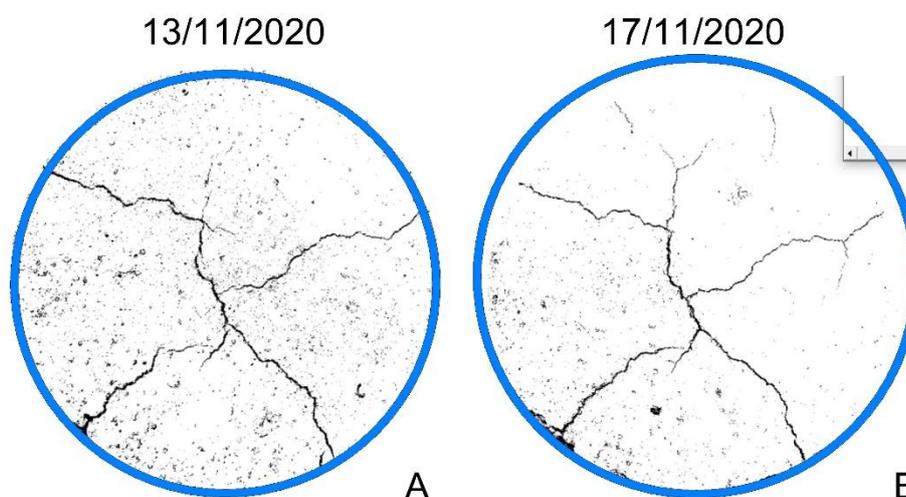
Data de início	13/11/2020
Data de término	17/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	24,5
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	2,7
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	42,5
Radiação solar média diária (h)	7,08

FIGURA A.9 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA A.10 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

## APÊNDICE B – SOLO B, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO

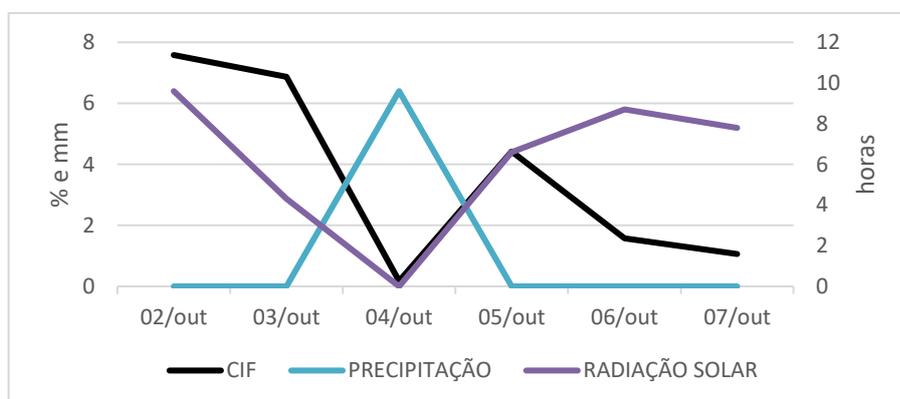
### B CICLO 2

A seguir tem-se a TABELA B.1 com as informações gerais sobre o ciclo 2 do solo B, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA B.1) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA B.2).

TABELA B.1 - Informações gerais.

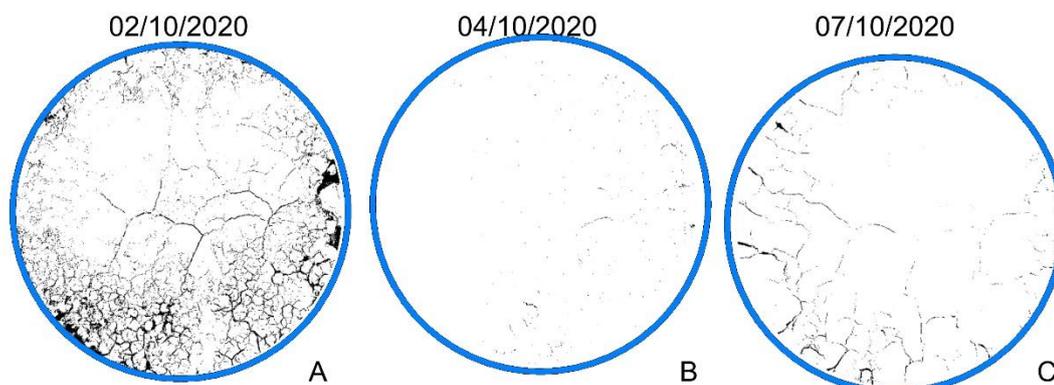
Data de início	02/10/2020
Data de término	07/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	55,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6,4
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	37
Radiação solar média diária (h)	6,17

FIGURA B.1 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA B.2 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

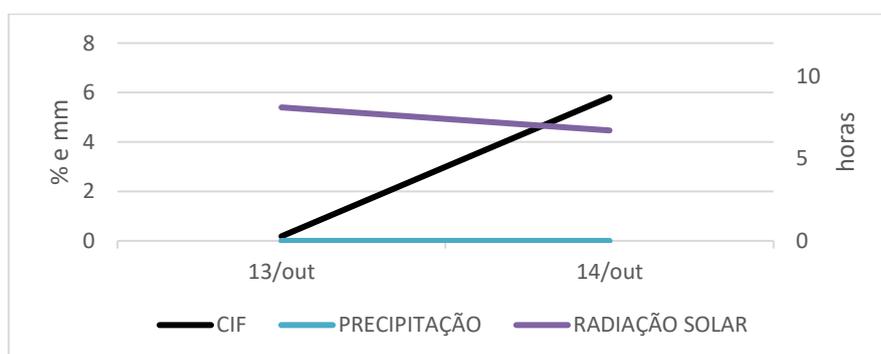
### B CICLO 3

A seguir tem-se a TABELA B.2 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo B, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA B.3) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA B.4).

TABELA B.2 - Informações gerais.

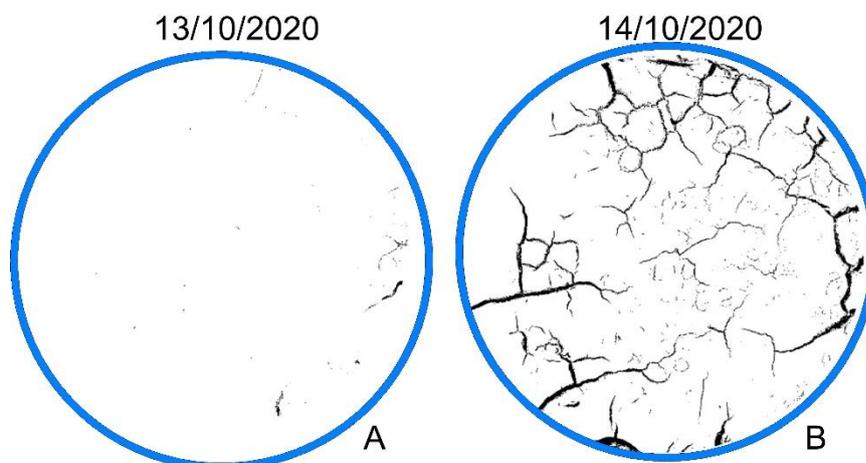
Data de início	13/10/2020
Data de término	14/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	42,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	14,8
Radiação solar média diária (h)	7,4

FIGURA B.3 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA B.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

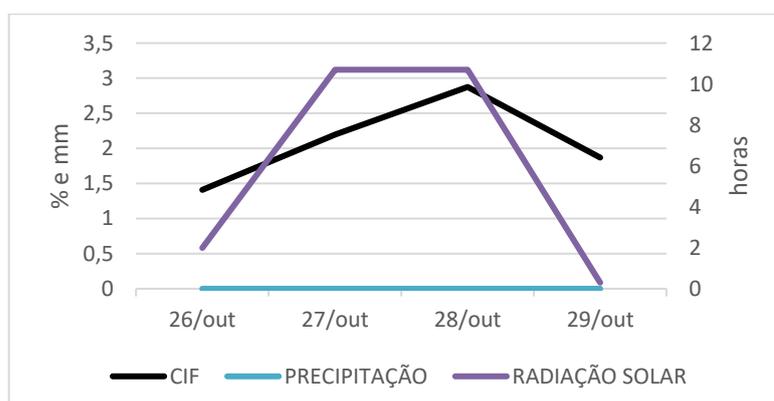
## B CICLO 5

A seguir tem-se a TABELA B.3 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo B, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA B.5) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA B.6).

TABELA B.3 - Informações gerais.

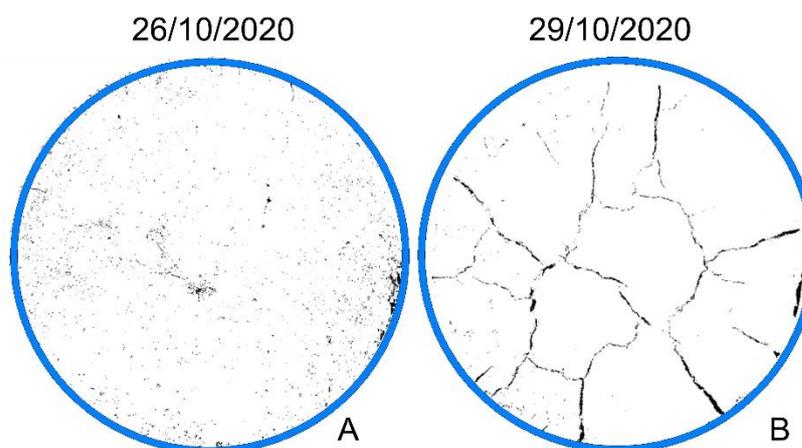
Data de início	26/10/2020
Data de término	29/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	23,7
Radiação solar média diária (h)	5,93

FIGURA B.5 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA B.6 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

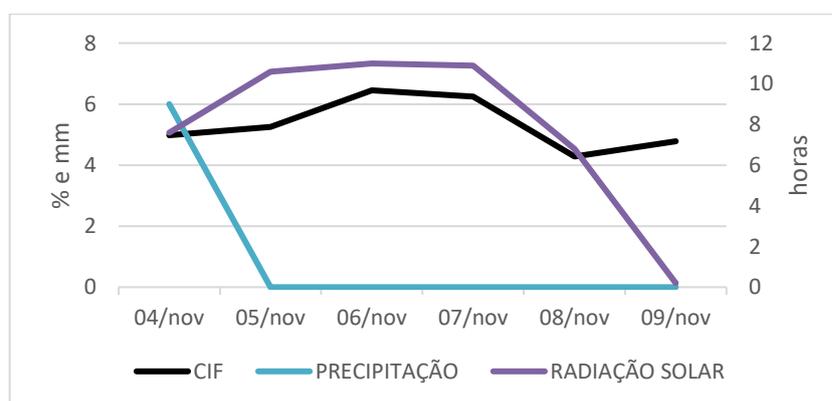
## B CICLO 6

A seguir tem-se a TABELA B.4 com as informações gerais sobre o ciclo 6 do solo B, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA B.7) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA B.8).

TABELA B.4 - Informações gerais.

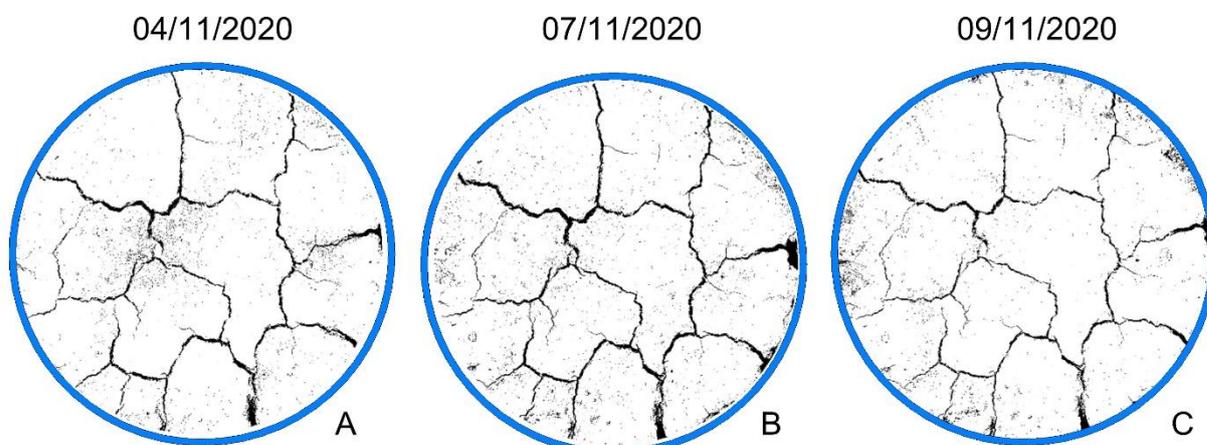
Data de início	04/11/2020
Data de término	09/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	47,1
Radiação solar média diária (h)	7,85

FIGURA B.7 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA B.8 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

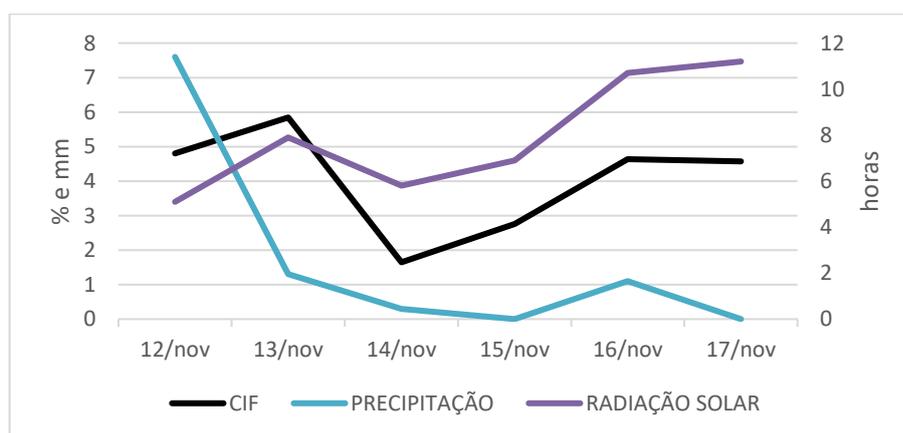
## B CICLO 7

A seguir tem-se a TABELA B.5 com as informações gerais sobre o ciclo 7 do solo B, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA B.9) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA B.10).

TABELA B.5 - Informações gerais.

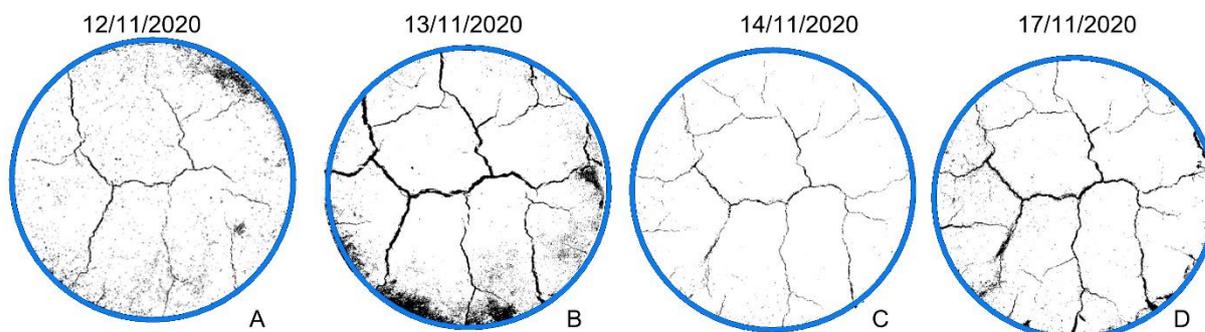
Data de início	12/11/2020
Data de término	17/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	10,3
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	47,6
Radiação solar média diária (h)	7,93

FIGURA B.9 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA B.10 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

## APÊNDICE C – SOLO C, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO

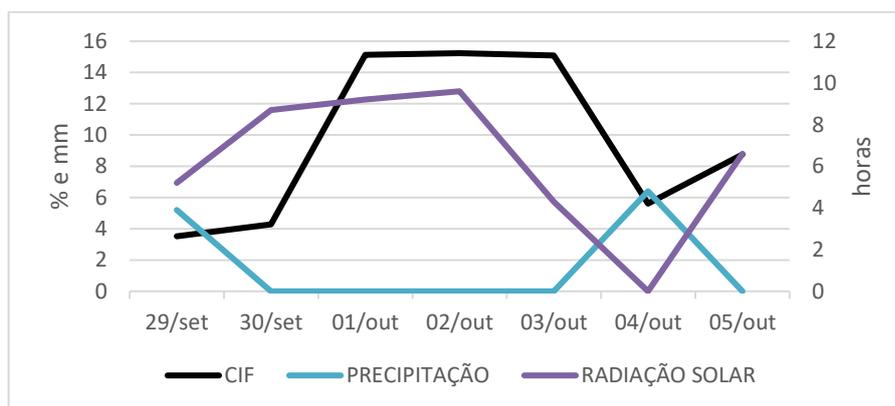
### C CICLO 2

A seguir tem-se a TABELA C.1 com as informações gerais sobre o ciclo 2 do solo C, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA C.1) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA C.2).

TABELA C.1 - Informações gerais.

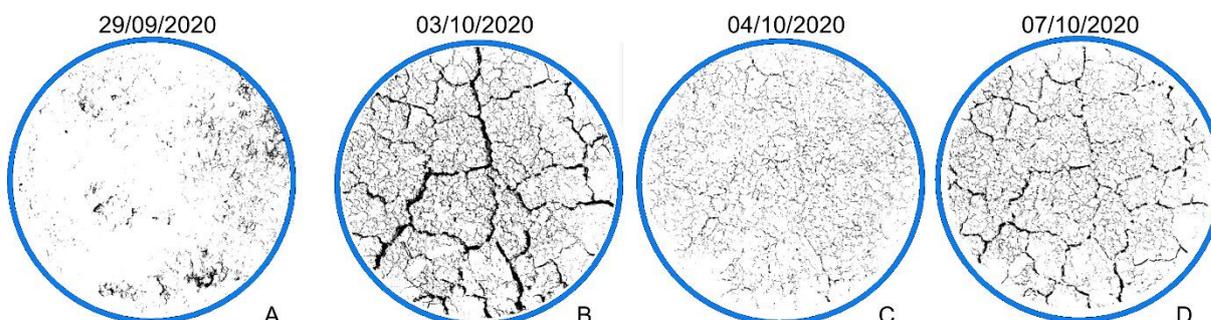
Data de início	29/09/2020
Data de término	07/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	55,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6,4
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	37
Radiação solar média diária (h)	6,17

FIGURA C.1 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA C.2 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

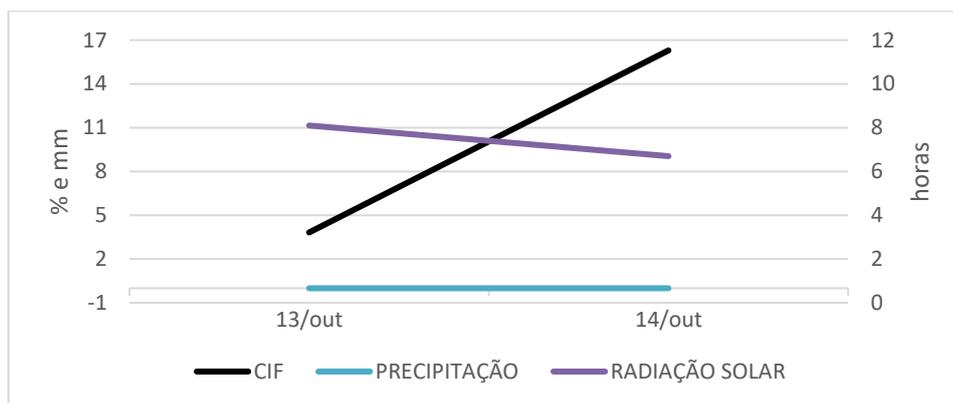
### C CICLO 3

A seguir tem-se a TABELA C.2 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo C, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA C.3) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA C.4).

TABELA C.2 - Informações gerais.

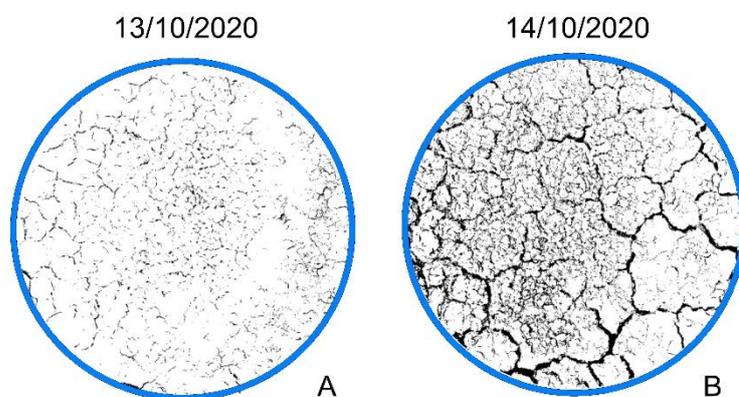
Data de início	13/10/2020
Data de término	14/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	34,4
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	14,8
Radiação solar média diária (h)	7,4

FIGURA C.3 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA C.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

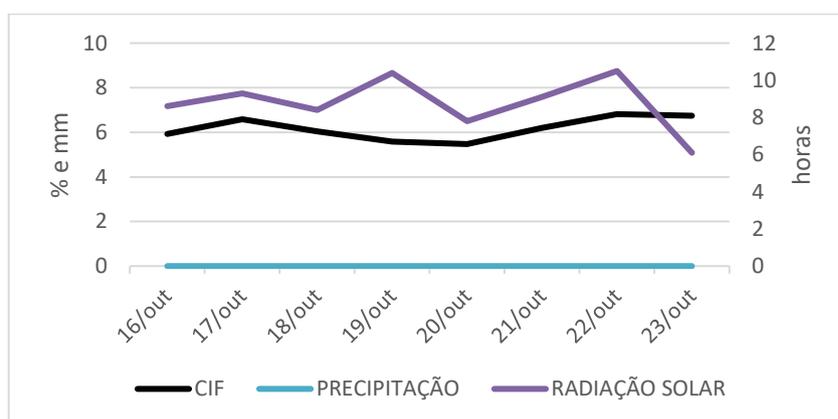
## C CICLO 4

A seguir tem-se a TABELA C.3 com as informações gerais sobre o ciclo 4 do solo C, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA C.5) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA C.6).

TABELA C.3 - Informações gerais.

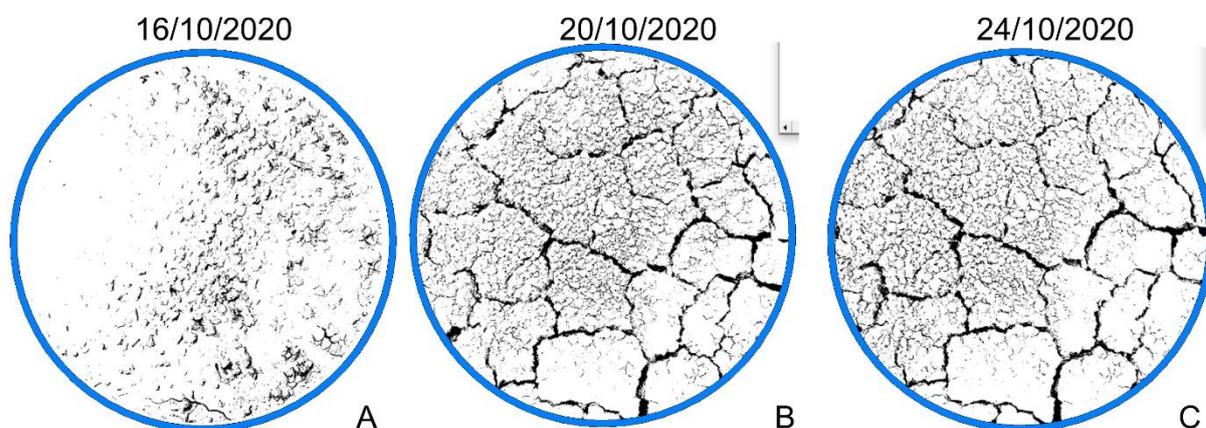
Data de início	16/10/2020
Data de término	24/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,8
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	76,6
Radiação solar média diária (h)	8,51

FIGURA C.5 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA C.6 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

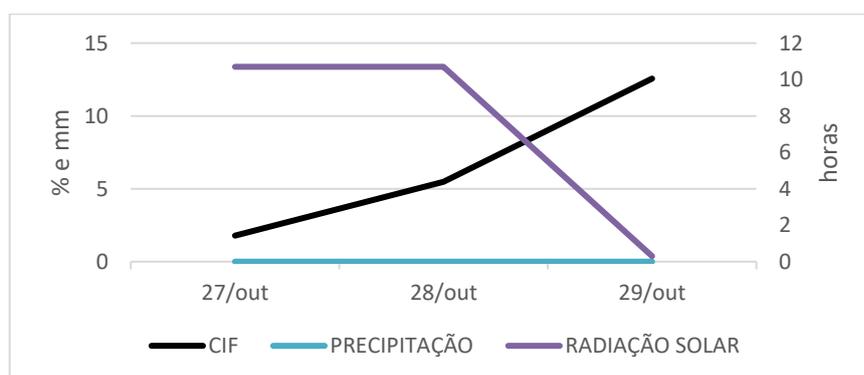
## C CICLO 5

A seguir tem-se a TABELA C.4 com as informações gerais sobre o ciclo 5 do solo C, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA C.7) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA C.8).

TABELA C.4 - Informações gerais.

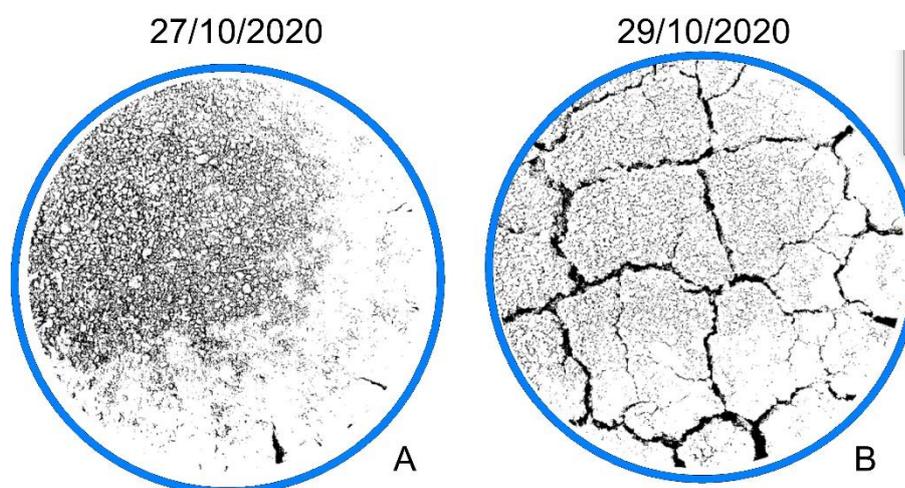
Data de início	27/10/2020
Data de término	29/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	21,7
Radiação solar média diária (h)	7,23

FIGURA C.7 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA C.8 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

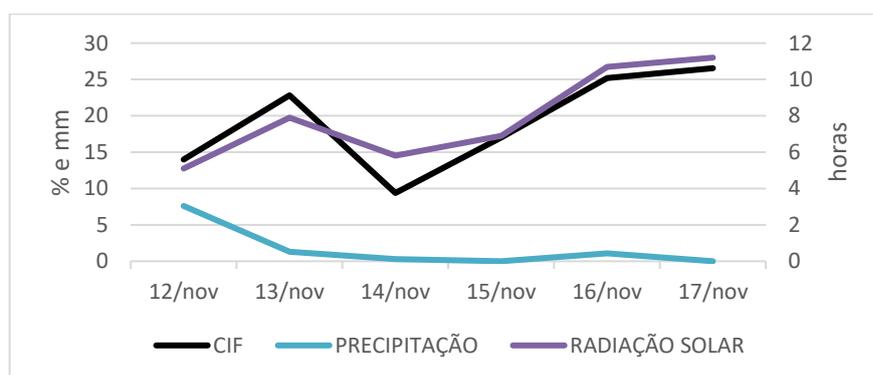
## C CICLO 7

A seguir tem-se a TABELA C.5 com as informações gerais sobre o ciclo 7 do solo C, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA C.9) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA C.10).

TABELA C.5 - Informações gerais.

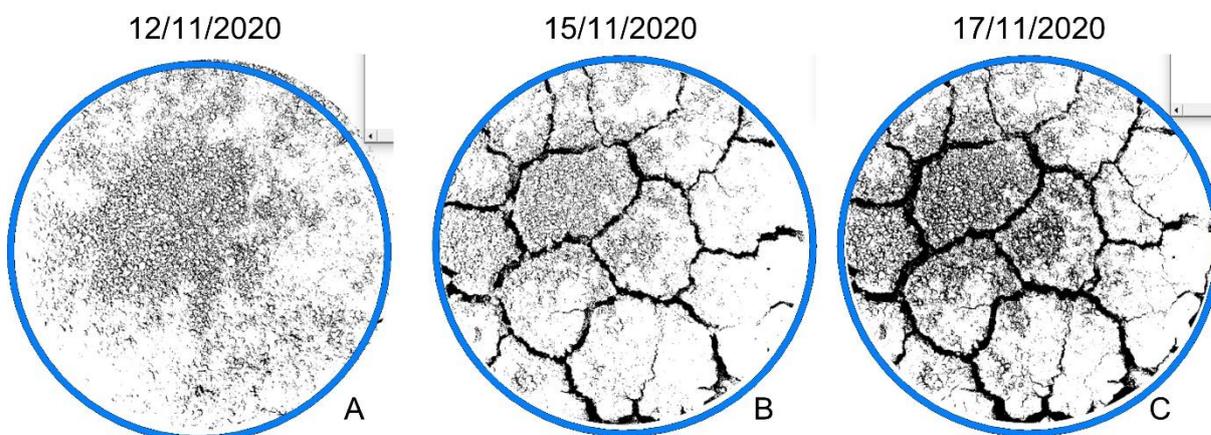
Data de início	12/11/2020
Data de término	17/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	10,3
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	47,6
Radiação solar média diária (h)	7,93

FIGURA C.9 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA C.10 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

## APÊNDICE D – SOLO D, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO

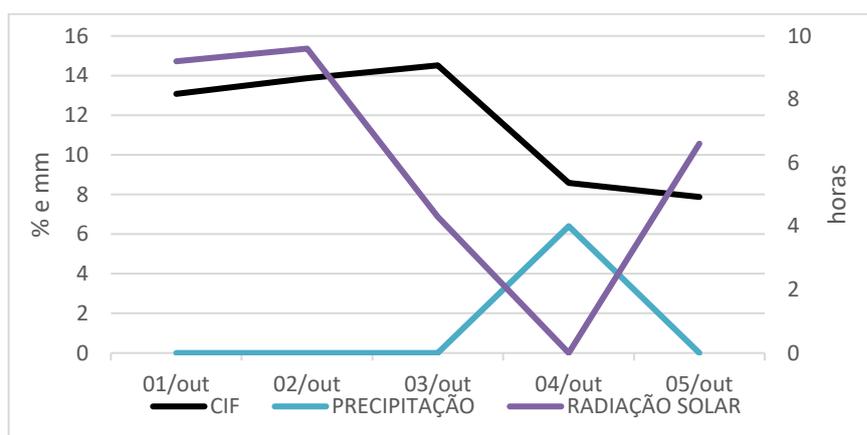
### D CICLO 2

A seguir tem-se a TABELA D.1 com as informações gerais sobre o ciclo 2 do solo D, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA D.1) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA D.2).

TABELA D.1 - Informações gerais.

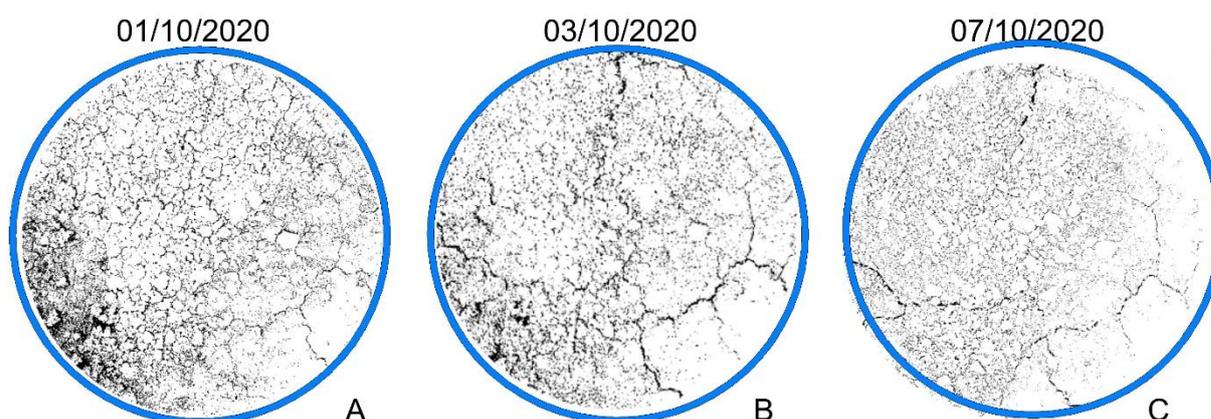
Data de início	01/10/2020
Data de término	07/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	55,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	6,4
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	46,2
Radiação solar média diária (h)	6,6

FIGURA D.1 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA D.2 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

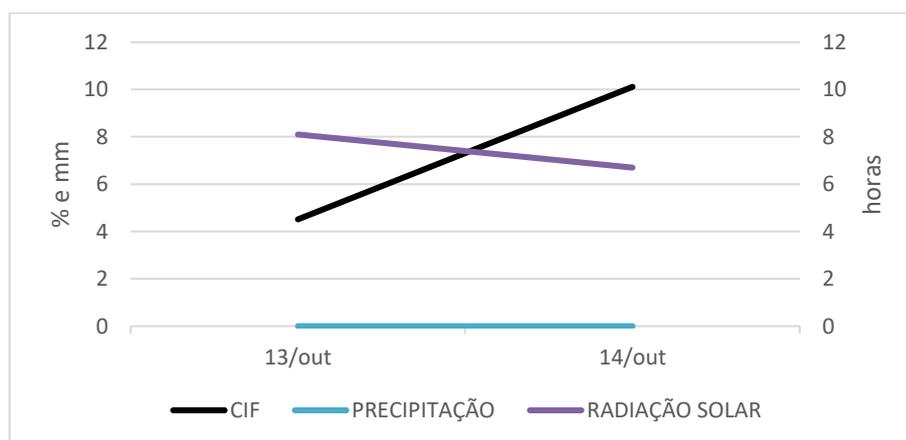
### D CICLO 3

A seguir tem-se a TABELA D.2 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo D, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA D.3) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA D.4).

TABELA D.2 - Informações gerais.

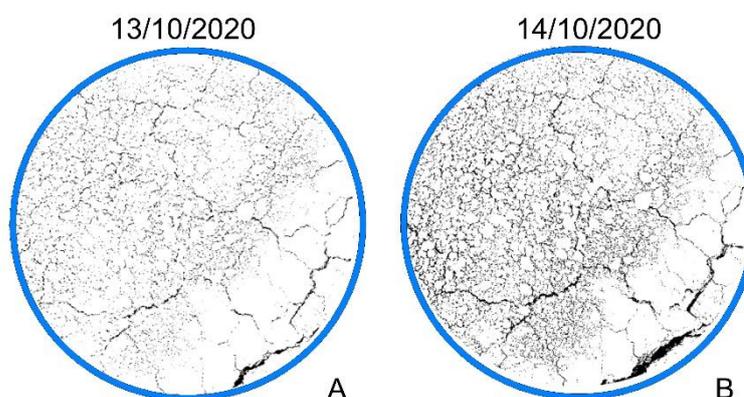
Data de início	13/10/2020
Data de término	14/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	42,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	14,8
Radiação solar média diária (h)	7,4

FIGURA D.3 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA D.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

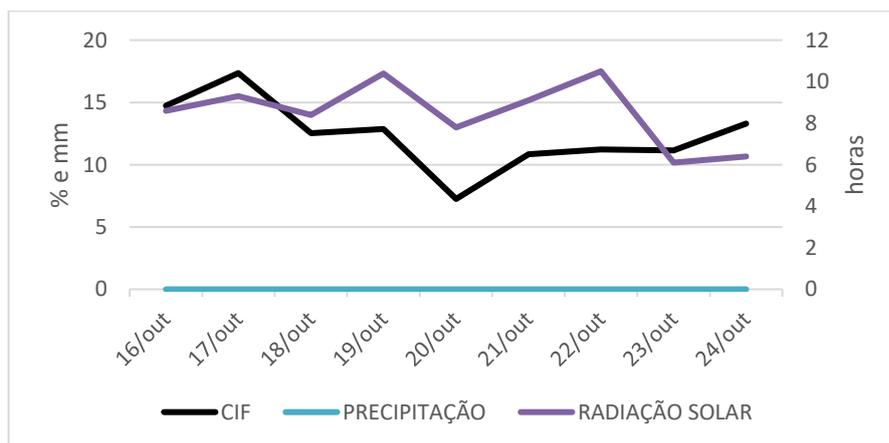
## D CICLO 4

A seguir tem-se a TABELA D.3 com as informações gerais sobre o ciclo 4 do solo D, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA D.5) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA D.6).

TABELA D.3 - Informações gerais.

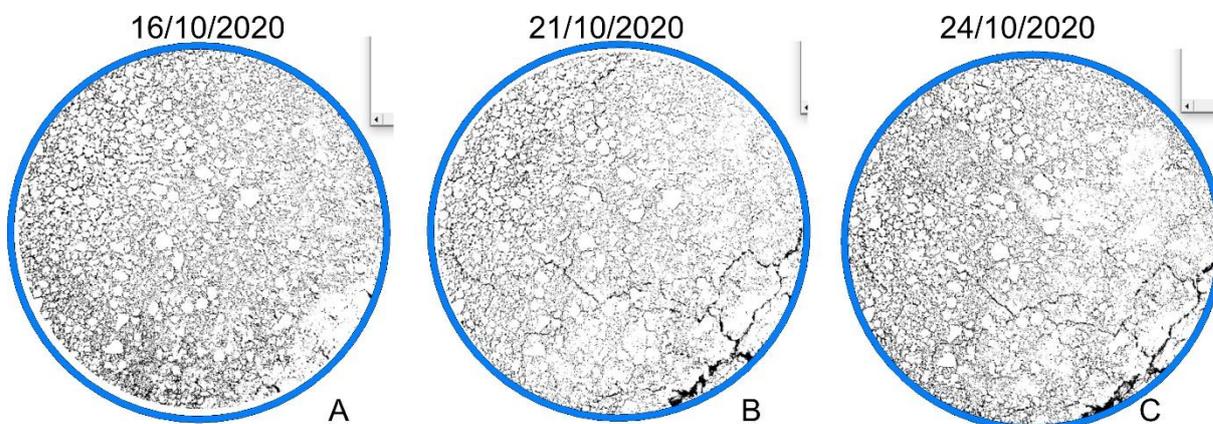
Data de início	16/10/2020
Data de término	24/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,8
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	76,6
Radiação solar média diária (h)	8,51

FIGURA D.5 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA D.6 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

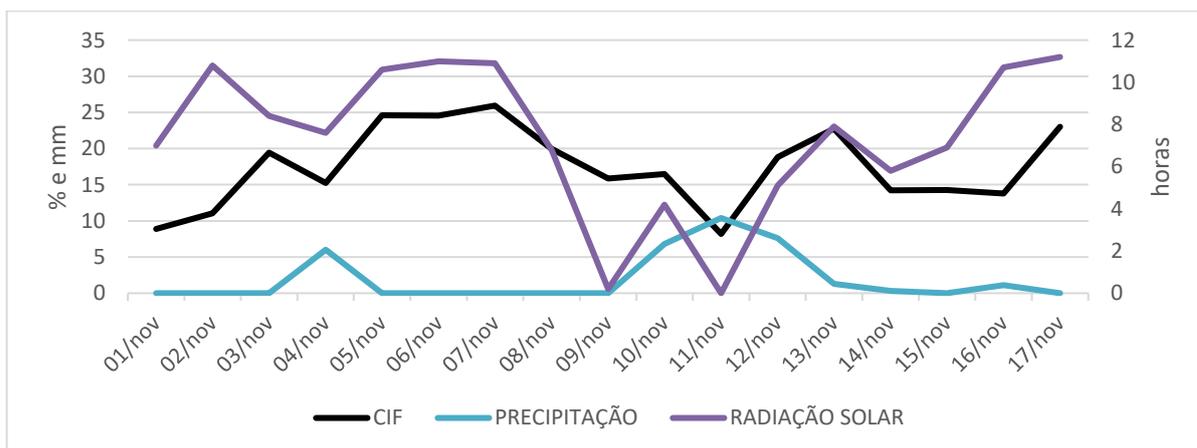
## D CICLO 6

A seguir tem-se a TABELA D.4 com as informações gerais sobre o ciclo 6 do solo D, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA D.7) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA D.8).

TABELA D.4 - Informações gerais.

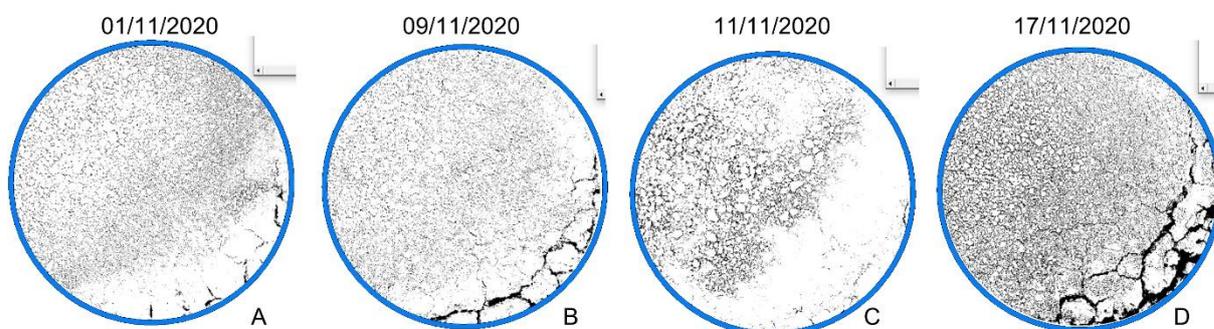
Data de início	01/11/2020
Data de término	17/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,6
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	33,5
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	125,1
Radiação solar média diária (h)	7,36

FIGURA D.7 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA D.8 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

## APÊNDICE E – SOLO E, CICLOS NÃO CITADOS NO TEXTO

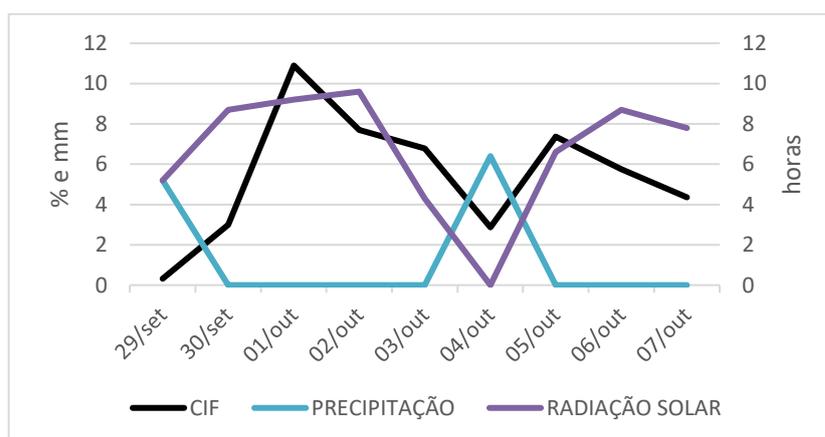
### E CICLO 2

A seguir tem-se a TABELA E.1 com as informações gerais sobre o ciclo 2 do solo E, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA E.1) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA E.2).

TABELA E.1 - Informações gerais.

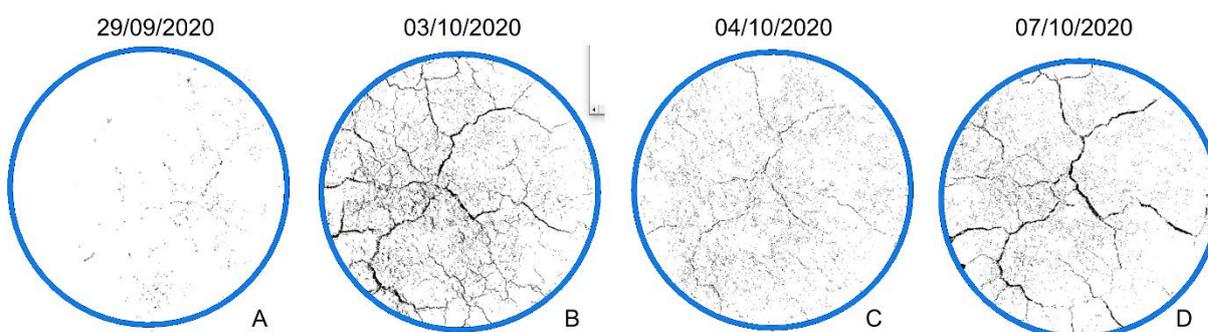
Data de início	29/09/2020
Data de término	07/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	50,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	11,6
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	60,1
Radiação solar média diária (h)	6,68

FIGURA E.1 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA E.2 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

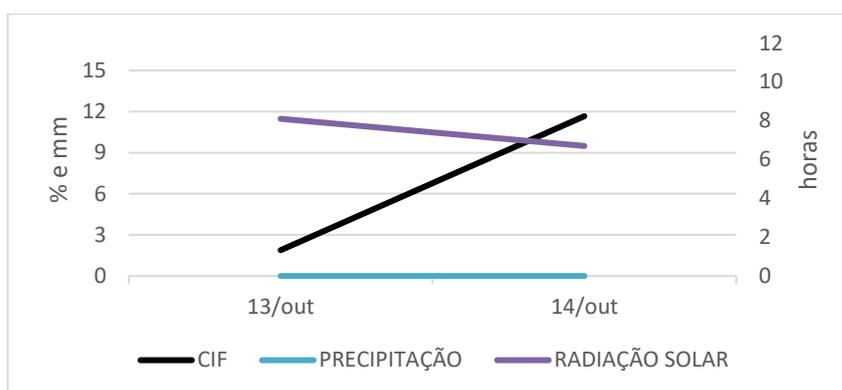
### E CICLO 3

A seguir tem-se a TABELA E.2 com as informações gerais sobre o ciclo 3 do solo E, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA E.3) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA E.4).

TABELA E.2 - Informações gerais.

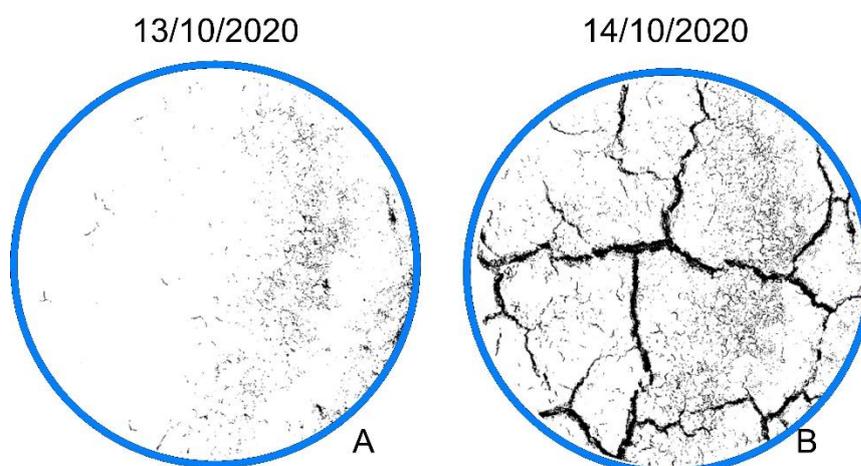
Data de início	13/10/2020
Data de término	14/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	42,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	14,8
Radiação solar média diária (h)	7,4

FIGURA E.3 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA E.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

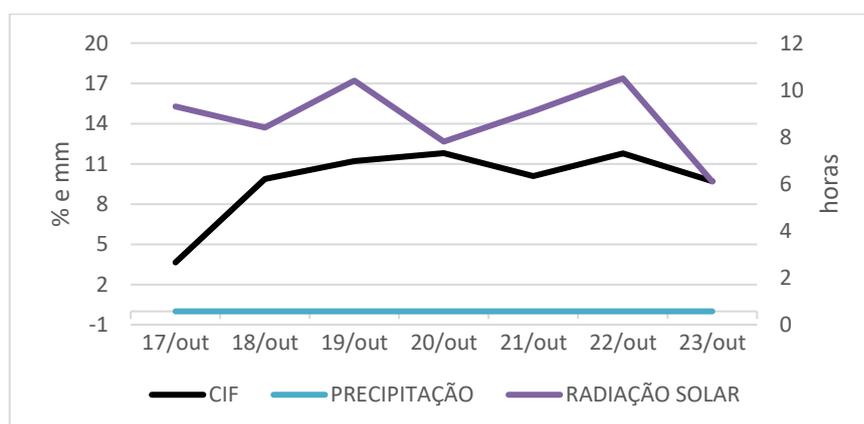
## E CICLO 4

A seguir tem-se a TABELA E.3 com as informações gerais sobre o ciclo 4 do solo E, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA E.5) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA E.6).

TABELA E.3 - Informações gerais.

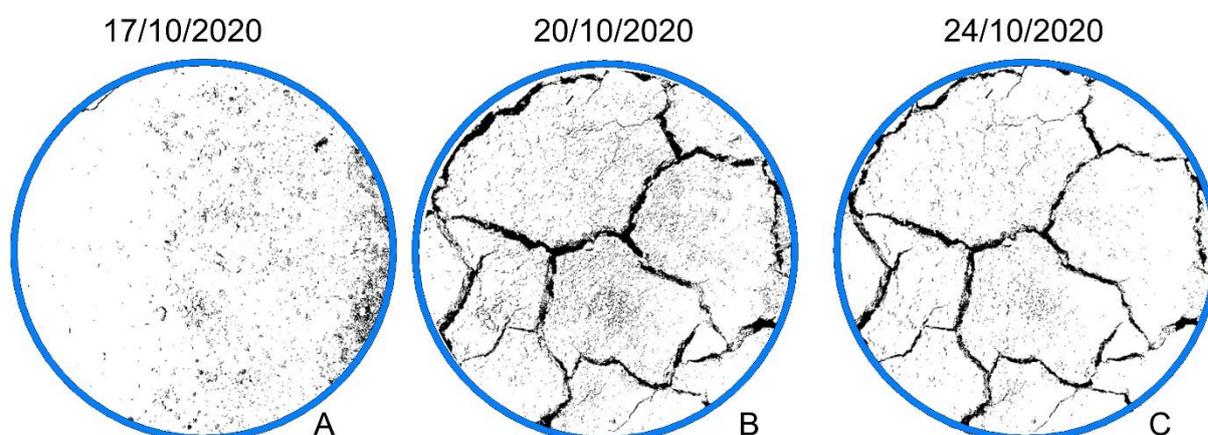
Data de início	17/10/2020
Data de término	24/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,8
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	68
Radiação solar média diária (h)	7,56

FIGURA E.5 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA E.4 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

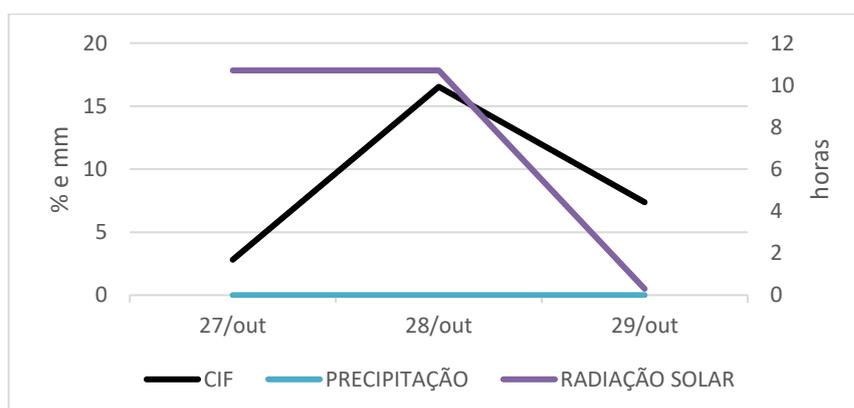
## E CICLO 5

A seguir tem-se a TABELA E.4 com as informações gerais sobre o ciclo 5 do solo E, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA E.7) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA E.8).

TABELA E.4 - Informações gerais.

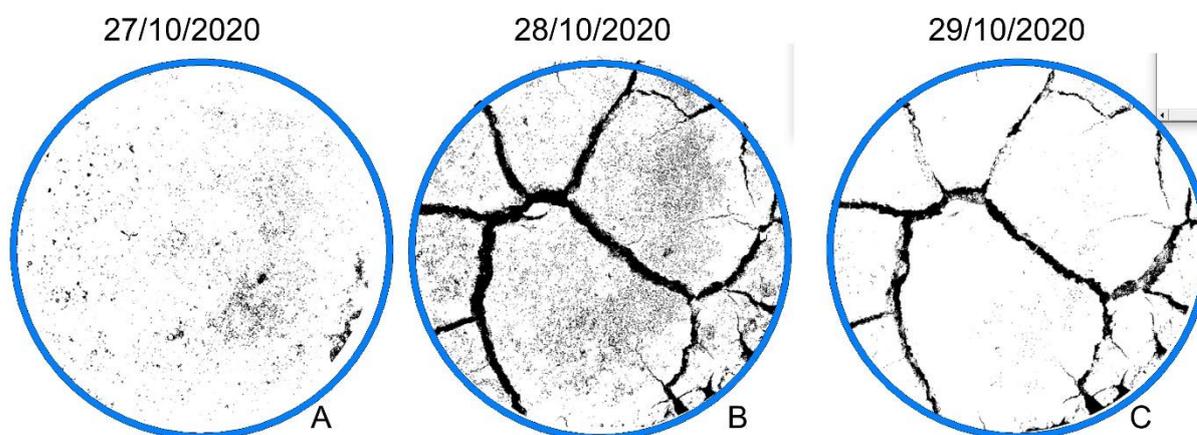
Data de início	27/10/2020
Data de término	29/10/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	22,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	0
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	21,7
Radiação solar média diária (h)	7,23

FIGURA E.7 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA E.8 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



Fonte: A autora

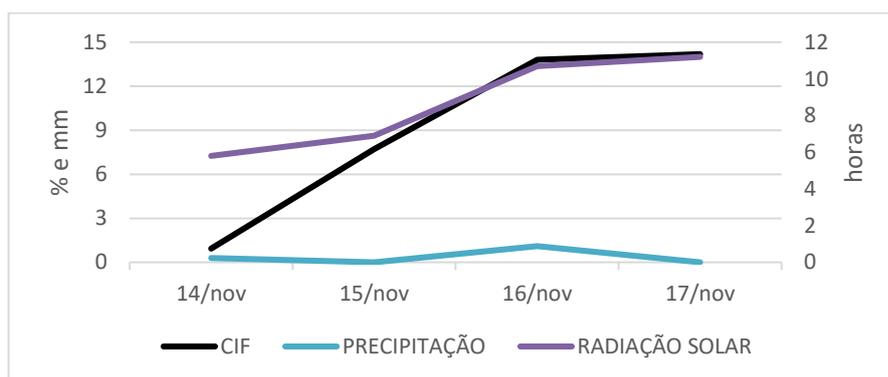
## E CICLO 7

A seguir tem-se a TABELA E.5 com as informações gerais sobre o ciclo 7 do solo E, bem como as figuras mostrando a relação entre o CIF e a precipitação e radiação solar (FIGURA E.9) e as imagens da evolução das fissuras (FIGURA E.10).

TABELA E.5 - Informações gerais.

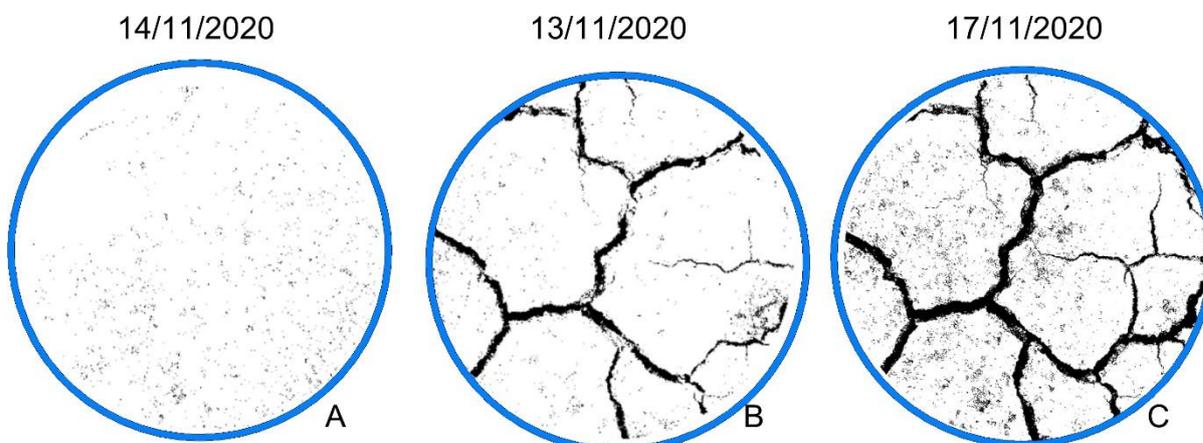
Data de início	14/11/2020
Data de término	17/11/2020
Precipitação recebida antes do início do ciclo (mm)	17,2
Precipitação recebida durante o ciclo (mm)	1,4
Radiação solar total recebida durante o ciclo (h)	34,6
Radiação solar média diária (h)	8,65

FIGURA E.9 - Correlação entre CIF, precipitação e radiação solar.



Fonte: A autora

FIGURA E.10 - Evolução das fissuras com processamento de imagem



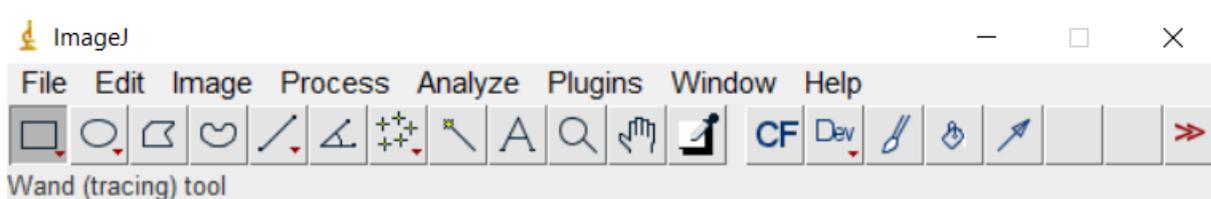
Fonte: A autora

## APÊNDICE F – PROCESSEMENTO DAS IMAGENS COM *IMAGE J*

Para o processamento das imagens foi utilizado o *software Image J*, o passo a passo do procedimento será detalhado nesse apêndice.

A FIGURA F.1 traz a simples interface do *software* que contém apenas duas linhas de comandos.

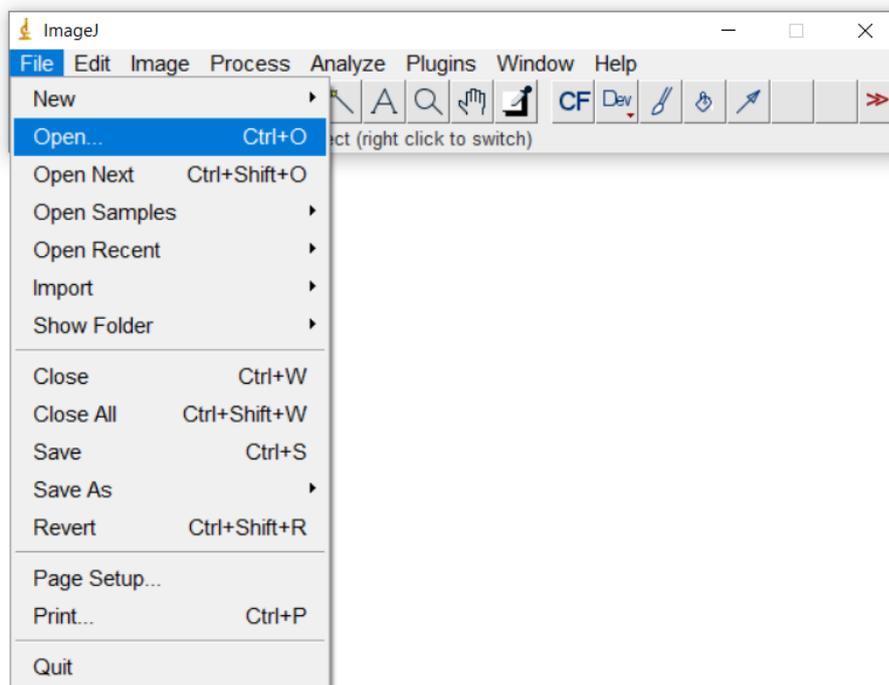
FIGURA F.1 – Interface do *software Image J*



Fonte: A autora (2021)

A primeiro passo é fazer a entrada da imagem que será processada (FIGURA F.2).

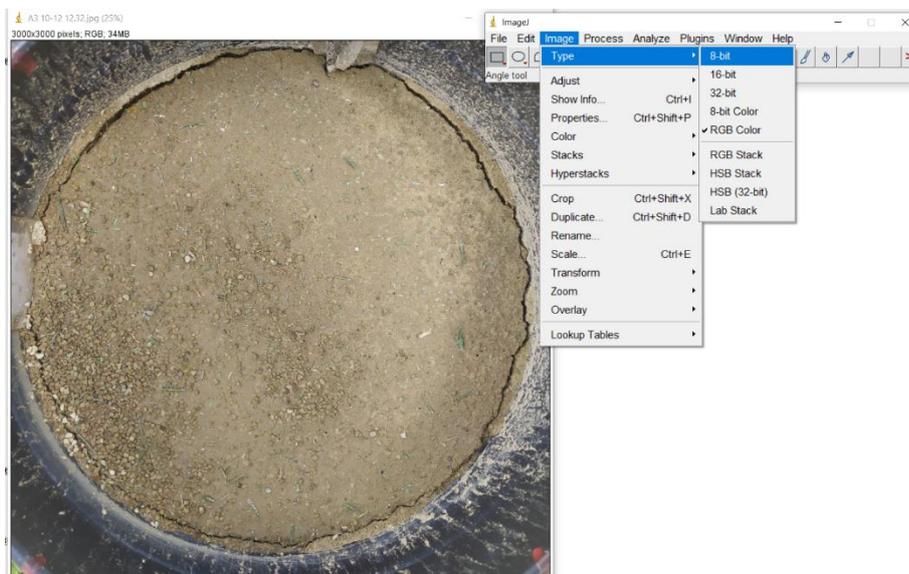
FIGURA F.2 – Carregando imagem para processamento



Fonte: A autora (2021)

Com a imagem carregada é necessário transformá-la em uma imagem em escala de cinza com o auxílio da ferramenta 8-bit. A FIGURA F.3 mostra o caminho para acessar a ferramenta.

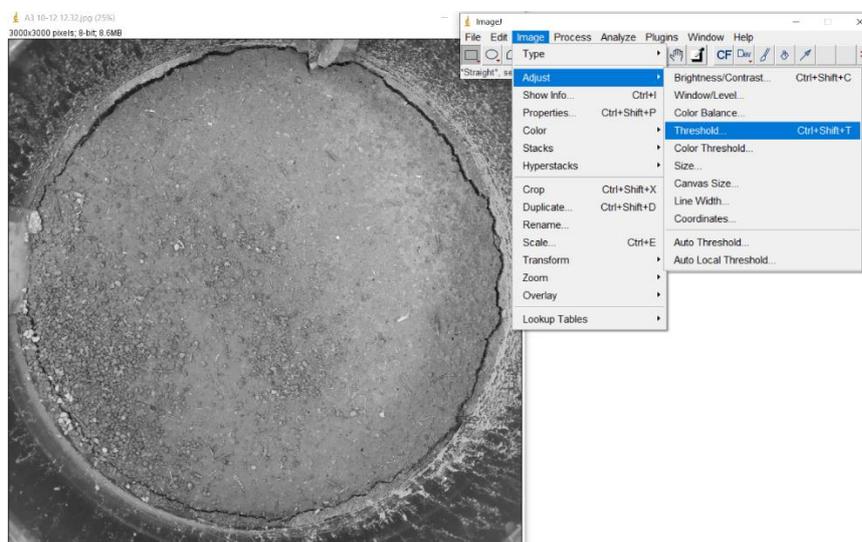
FIGURA F.3– Transformar a imagem em escala de cinza



Fonte: A autora (2021)

O próximo processo é adicionar um limiar para separar a escala de cinza em pixels pretos e pixels brancos. Para acessar a caixa que nos permite fazer a alteração é necessário seguir os passos da FIGURA F.4.

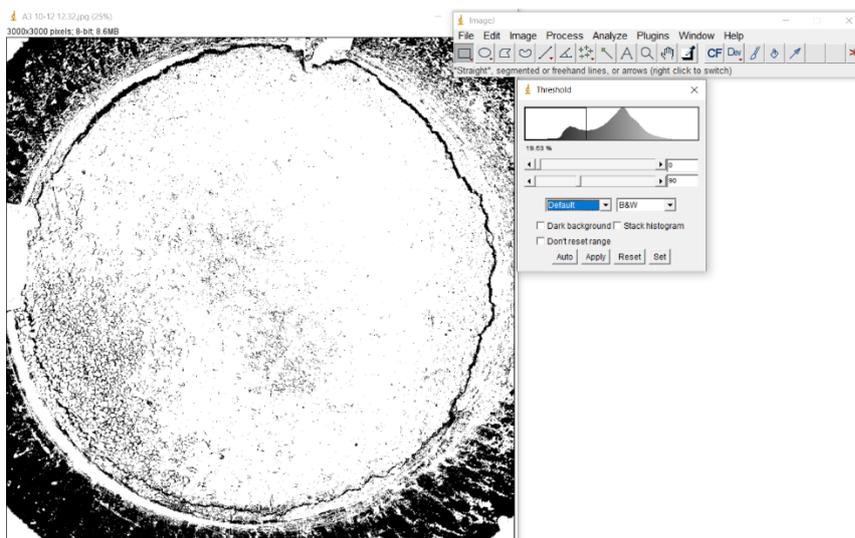
FIGURA F.4 – Onde alterar o limiar



Fonte: A autora (2021)

Para todos os casos desse trabalho foi utilizado o limiar com valor 90, como mostra a FIGURA F.5, ainda nessa figura é possível analisar como é uma imagem binária, onde há somente pixels pretos e pixels brancos.

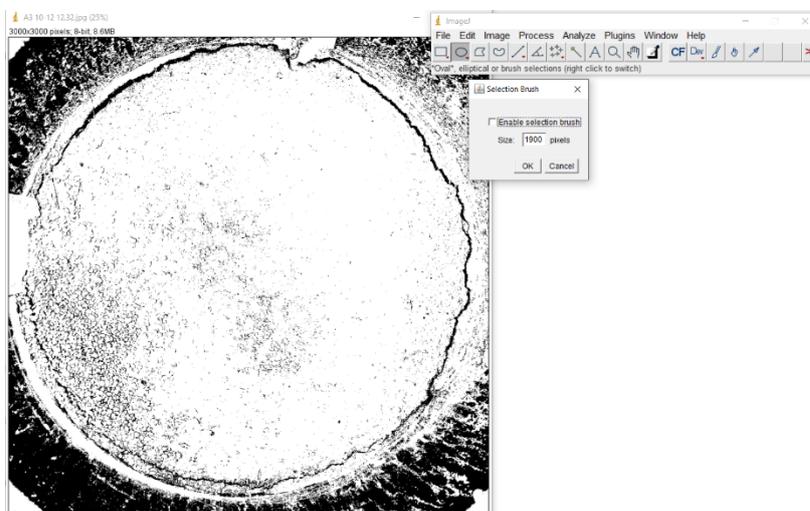
FIGURA F.5 – Imagem binarizada,



Fonte: A autora (2021)

Para que somente a região central, que é a parcela de interesse, seja analisada é necessário criar uma área chamada de máscara. A máscara inserida para todas as imagens possui o formato circular com diâmetro de 1900 pixels (FIGURA F.6), sendo que a imagem total possui 3000 pixels de altura e 3000 pixels de largura.

FIGURA F.6 – Criação da máscara



Fonte: A autora (2021)

Com auxílio das coordenadas presentes do software a máscara foi inserida no centro, com coordenadas 1500 pixels no eixo X e 1500 pixels no eixo Y. Na FIGURA F.7 os valores onde foi inserida a máscara então circulos.

FIGURA F.7 – Coordenadas centrais para colocação da máscara

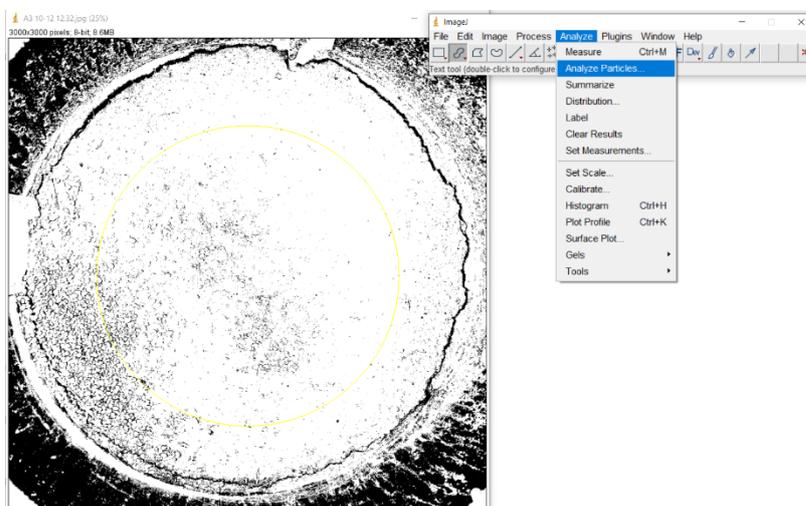


Fonte: A autora (2021)

A máscara fica representada na imagem como uma circunferência de cor amarela bem clara (FIGURA F.8).

O último passo é análise da imagem para que o *software* possa fazer a contagem dos pixels. A FIGURA F.8 mostra o caminho para esse procedimento.

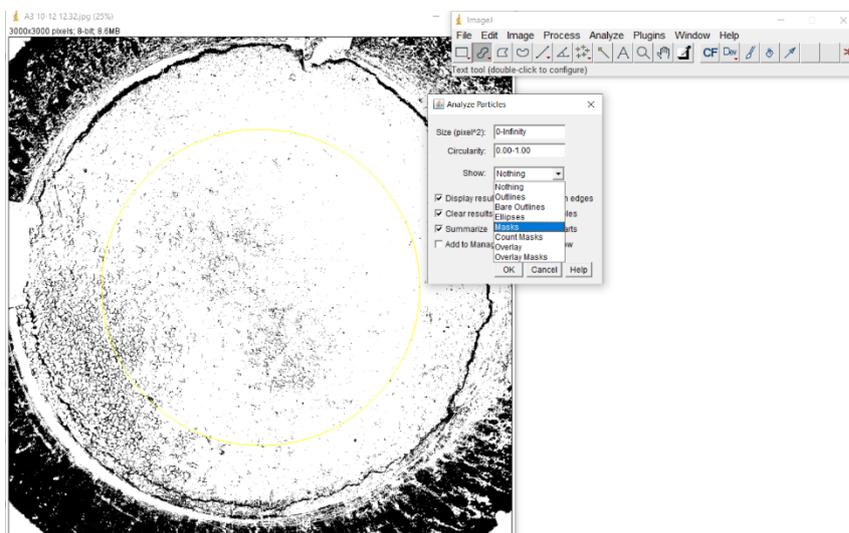
FIGURA F.8 – Caminho para análise da imagem



Fonte: A autora (2021)

Depois de clicar em *anализe particles* surgirá uma nova caixa (FIGURA F.9), nela será necessário utilizar a opção *masks*, assim a imagem será processada utilizando a máscara criada anteriormente.

FIGURA F.9 – Configurações para análise

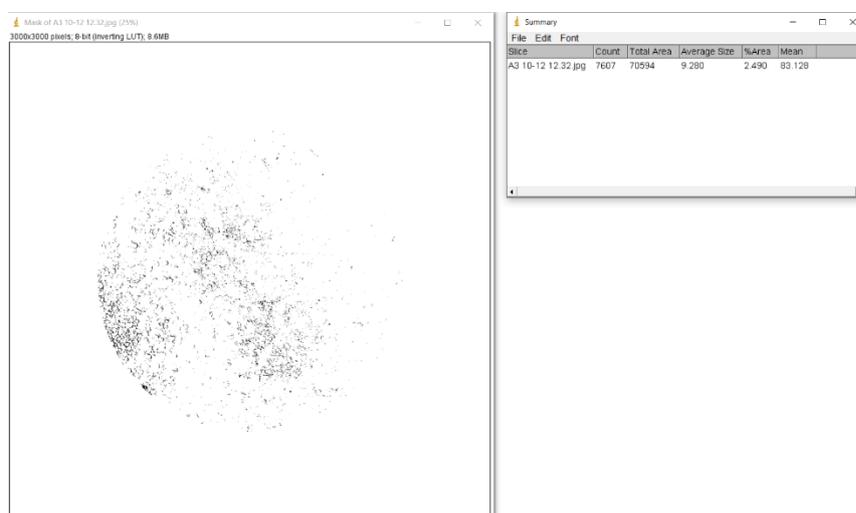


Fonte: A autora (2021)

Os resultados estarão no *summary*. A porcentagem de área indicada na coluna cinco é *CIF*.

A imagem excluindo a área fora da máscara criada também aparece nesse último passo (FIGURA F.10).

FIGURA F.10 – Resultados



Fonte: A autora (2021)