UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

GABRIELA BERGAMASCHI SECO

Aplicação da técnica de imagens por ressonância magnética para o desenvolvimento de estudo não invasivo dos efeitos do estresse hídrico no crescimento de raízes em plantas de batata

São Carlos
2012

GABRIELA BERGAMASCHI SECO

Aplicação da técnica de imagens por ressonância magnética para o desenvolvimento de estudo não invasivo dos efeitos do estresse hídrico no crescimento de raízes em plantas de batata

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Física Básica
Orientador: Prof. Dr. Alberto Tannús

Versão Corrigida
(versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação do IFSC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Seco, Gabriela Bergamaschi

Aplicação da técnica de imagens de ressonância magnética para o desenvolvimento de estudo não invasivo dos efeitos de estresse hídrico no crescimento de raízes em plantas de batata / Gabriela Bergamaschi Seco; orientador Alberto Tannus - versão corrigida -- São Carlos, 2012.
108 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Física Básica) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

1. Imagens por ressonância magnética. 2. Estresse hídrico. 3. Cultura da batata. I. Tannus, Alberto, orient. II. Título.

Aos meus pais, pelo amor, coragem, apoio e incentivo constantes, que foram
essenciais para todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por essa oportunidade.

Agradeço ao meu orientador, professor Alberto Tannús, e ao meu co-orientador Adolfo Posadas pela orientação, paciência, apoio, imensa compreensão e amizade.

Ao pessoal do laboratório, Daniel, Odir, João, Ricardo, Mateus e Edson, todos eles foram muito importantes para a realização desse trabalho, ajudando com ideias e ensinamentos. Em especial gostaria de agradecer à Jackie e ao Roberson, por sempre me ajudarem, principalmente na entrega da dissertação.

Ao pesquisador da EMBRAPA Marcos Ferreira, que sempre estava disposto a ajudar e a ensinar.

Ao Newton Granja do IAC pela ajuda na escolha dos nutrientes e ao João Pepino pela ajuda na utilização e fornecimento de nutrientes.

Ao Natalino Shimoyama da ABBA, pelo fornecimento das batatas-semente que foram utilizadas para a realização do estudo.

Aos colaboradores do CIP, que mesmo distantes auxiliaram bastante.

Aos meus pais, Natal e Maria Alice, que me apoiaram e incentivaram principalmente nos momentos mais difíceis e que sempre tiveram muita coragem para enfrentar os desafios.

À minha irmã Barbara, pelos conselhos, risadas e amizade.

Ao Leoni pela paciência, compreensão e incentivo.

Aos amigos de São Paulo, Paula, Nayanna, Drielle, Gabriel e outros que certamente esqueci, pela amizade, apoio e compreensão.

Aos amigos de São Carlos, Mariama, Milena, Giu, Aline, Carol, Juka, Fabiano, Regina, Ritinha, Meg, Sayuri, Rafael, Otavio e Miagui pela amizade, apoio e compreensão das ausências, em especial gostaria de agradecer a Driele pela grande amizade e por sempre estar disposta a ajudar.

Aos amigos de Fernandópolis, Leo, Mar, Mariela e Natália pela amizade eterna e apoio constante, mesmo com a distância tentando atrapalhar.

Ao IFSC, pela oportunidade do mestrado.

À EMBRAPA e ao CIP (Centro Internacional de La Papa) pela colaboração e apoio.

À CAPES pelo auxílio financeiro, que foi essencial para esse trabalho.

RESUMO

SECO, G. B. **Aplicação da técnica de imagem por ressonância magnética para desenvolvimento de metodologia de estudo não invasivo dos efeitos do estresse hídrico no crescimento de raízes em plantas de batata**. 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Considerando que a batata é o terceiro produto alimentar mais importante no mundo é necessária sua preservação e adaptação para as diferentes comunidades e condições ambientais do planeta, pois a consequência da redução da produção desse alimento pode ser a fome em todo o mundo. Um potencial causador desse problema é o aquecimento global, que é cada vez mais aceito pela ciência e as mudanças climáticas que vêm acontecendo no planeta. Alguns estudos sobre o efeito do aquecimento global e também mais especificamente do estresse hídrico sobre a cultura da batata estão sendo realizados, e são analisados os efeitos sobre cada parte da planta, como folhas, brotos, raízes, etc, porém o estudo sobre a raiz da batata é realizado de forma invasiva, ou seja, é necessário remover a planta do substrato. Nesse trabalho, apresentamos uma técnica para o estudo dos efeitos do estresse hídrico sobre a raiz da batata de forma não invasiva, portanto, os estudos serão realizados sem a remoção da planta do substrato. Dessa forma, poderão ser acompanhados os efeitos do estresse hídrico na planta em todos os estádios do desenvolvimento. Além disso, pode-se acompanhar o crescimento natural da raiz, diferentemente de outros modelos de estudo. A análise foi realizada com amostras da cultivar Ágata, plantadas em substrato sem substâncias paramagnéticas, e para isso foi utilizada a cultura hidropônica. Foram realizadas Imagens de Ressonância Magnética e em seguida um processamento e quantificação das imagens através da ferramenta matemática Multifractal. A técnica mostrou-se promissora para esse estudo, pois parâmetros multifractais mostraram-se sensíveis ao estresse hídrico, portanto, poderão ser realizados futuros estudos em outras cultivares de batata sob efeito do estresse hídrico.

Palavras-chave: Imagem por ressonância magnética. Estresse hídrico. Cultura da batata.

ABSTRACT

SECO, G. B. **The magnetic resonance imaging technique for the development of non-invasive study of water stress effects on potato plants root growth.** 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Considering that potato is the third most important food product in the world, it is necessary its preservation and adaptation to different communities and environmental conditions on the planet, because the consequence of reducing the production of that crop may be the hunger of people around the world. With global warming, which is increasingly more accepted by science, and the climate changes that are happening on the planet it is necessary to generate new genotypes more resistant to these changes, as well as the generation of varieties suitable for tropical climates. Some studies on the effect of global warming and also more specifically on water stress on potato crops are being conducted. In these studies, one analyze the effects on every part of the plant, such as leaves, shoots, roots, etc., but the study on potato root is conducted invasively, i.e., to observe the result is necessary to remove the plant from the substrate. In this work, we present a technique for studying the effects of water stress on the potato root in a noninvasively way, therefore, various studies may be performed without requiring the removal of the plant from the substrate. Thus, the studies may accompany the effects of water stress on the plant at all stages of development. In addition, this tool allows the observation and monitoring of the natural growth of the root, unlike the other study designs. The analysis was performed with samples of cultivar Agata, planted in cups with substrate containing no paramagnetic substances, and to make this possible hydroponic culture was used. Magnetic Resonance Imaging studies were performed followed by processing and quantification of the images obtained through the mathematical tool Multifractal . The technique has shown promising for this study because multifractal parameters were sensitive to water stress, so future studies can be conducted in other potato cultivars under effect of water stress

Keywords: Magnetic Resonance Imaging. Water stress. Potato crop.

Lista de Abreviaturas e Siglas

CIP	Centro Internacional de la Papa
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
FOV	<i>Field of View</i>
ABBA	Associação Brasileira de Batata
FLASH	<i>Fast Low Angle Shot</i>
RARE	<i>Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement</i>
MASS	<i>Multifractal Analysis & Scaling System</i>
DFT	<i>Deep Flow Technique</i>
NFT	<i>Nutrient Film Technique</i>
IRM	Imagem de Ressonância Magnética
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
RL	Referencial do Laboratório
RG	Referencial Girante
RF	Rádio Frequência
FID	<i>Free Induction Decay</i>
MSSE	<i>Multi Slice Spin Eco</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
	2.1 BOTÂNICA.....	23
	2.2 O ESTRESSE HÍDRICO SOBRE A CULTURA DA BATATA.....	24
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	27
	3.1 IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR.....	27
	3.1.1 INTERAÇÃO ENTRE ÁTOMO E CAMPO MAGNÉTICO.....	27
	3.1.2 IMAGEM DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR.....	32
	3.1.3 SEQUÊNCIA <i>SPIN ECHO</i> (SE).....	39
	3.2 TEORIA MULTIFRACTAL.....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
	4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	47
	4.2 SISTEMA DE VÁCUO.....	49
	4.3 SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	50
	4.4 PARÂMETROS DAS IMAGENS.....	52
	4.5 METODOLOGIA.....	55
	4.6 TRATAMENTO DAS IMAGENS.....	58
	4.7 ANÁLISE MULTIFRACTAL.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
6	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

Considerando que a batata é o terceiro produto alimentar mais importante no mundo (1), é necessária sua preservação e adaptação para as diferentes comunidades e condições ambientais do planeta, pois a consequência da redução da produção desse alimento pode ser a fome de pessoas em todo o mundo. Um potencial causador desse problema é o aquecimento global, que é cada vez mais aceito pela ciência (2), e as mudanças climáticas que vêm acontecendo no planeta é necessária a geração de novos genótipos mais resistentes a estas mudanças, assim como a geração de variedades próprias para climas tropicais (3-7).

Alguns estudos sobre o efeito do aquecimento global (8, 9) e também mais especificamente do estresse hídrico (10-14) sobre a cultura da batata estão sendo realizados, através de avaliações do estresse hídrico de plantas utilizando técnicas baseadas em sensores remotos, como fluorescência, refletância e infravermelho. Estas técnicas são baseadas na detecção de certos parâmetros físicos, químicos e biológicos existentes nos processos de interação da planta (copa) com a radiação solar (15-17). Nesses estudos, são analisados os efeitos sobre cada etapa da planta, como folhas, brotos, raízes, etc.

O estudo da raiz nessas condições é muito importante, pois quando há problemas de estresse hídrico de uma planta, a raiz é de vital importância para a vida e a morte dela. Por exemplo, na ausência crítica de água nas vizinhanças da raiz ocorre uma reação liberando sinais de “alarme” através do ácido abscísico (ABA) levando informação às folhas para que fechem seus estômatos e comecem a poupar água (18, 19). Porém, o estudo sobre a raiz da batata é realizado de forma invasiva, ou seja, para observar o resultado é necessário remover a planta do substrato.

Nesse trabalho, apresentamos uma técnica para o estudo dos efeitos do estresse hídrico sobre a raiz da batata de forma não invasiva, portanto, poderão ser realizados diversos estudos sem que seja necessária a remoção da planta do substrato. Dessa forma, poderão ser acompanhados os efeitos do estresse hídrico na planta em todos os estádios do desenvolvimento, além disso, essa ferramenta

permite a observação e acompanhamento do crescimento natural da raiz, diferentemente dos outros modelos de estudo.

A análise foi realizada com amostras da cultivar Ágata, plantadas em recipientes com substrato que não contém substâncias paramagnéticas. Para que isso fosse possível foi utilizada a cultura hidropônica (20, 21), ou seja, a planta foi cultivada em substrato de areia e os nutrientes necessários eram inseridos externamente durante a irrigação.

A irrigação era feita com diferentes quantidades de água em diferentes amostras, resultando em algumas amostras com estresse hídrico e outras com a quantidade suficiente de água. Foram realizadas Imagens de Ressonância Magnética (IRM) (22) durante um período de aproximadamente 18 dias e em seguida foi realizado um processamento e quantificação das imagens obtidas através da ferramenta matemática Multifractal (23-25)

A técnica de imagens por ressonância magnética (IRM) (22, 26-28) tem sido um método promissor por ser uma técnica não invasiva. Além da IRM podemos incluir também a espectroscopia por ressonância magnética nuclear (ERMN), técnica de alta resolução espectral, que é também não invasiva e não destrutiva. Ambas as técnicas possuem muitas aplicações em anatomia e fisiologia em células de plantas, órgãos de plantas e plantas vivas (29, 30), mas embora a técnica de MRI seja bem conhecida em aplicações biomédicas, ainda está longe de ser uma ferramenta de rotina na pesquisa com plantas.

Como as raízes de uma planta contêm alta concentração de água, isto facilitará o mapeamento da estrutura das raízes no solo de forma intacta. Algumas considerações devem ser adequadas, como o tipo de substrato utilizado para o crescimento das raízes, que deve evitar a presença de materiais ferrosos, minerais, substâncias paramagnéticas dentre outros.

Quanto à ferramenta Multifractal, trata-se de uma análise de dados de séries temporais e é de grande importância para a caracterização, quantificação, modelagem e predição de muitos fenômenos naturais, como precipitação de chuvas, temperaturas de superfície do mar, movimento do lençol freático, contaminação do ar, da água e do solo, dentre outros.

O trabalho apresentado nesse material tem caráter interdisciplinar, abordando o cultivo de plantas, técnicas de IMR e ferramenta matemática multifractal.

No capítulo 2 são apresentados estudos realizados sobre estresse hídrico na cultura de planta, onde se mostra que os efeitos causados na planta também refletem na produtividade. O capítulo 3 é sobre a teoria que envolve as técnicas que compõem a metodologia introduzida nesse trabalho, ou seja, a ferramenta de obtenção de IMR e a de análise Multifractal. No capítulo 4 é descrito todo o processo de metodologia do trabalho e também os materiais utilizados durante esse processo, portanto, é apresentado desde o cultivo da batata, passando pela obtenção de imagens e finalmente a obtenção das análises multifractais. No capítulo 5 são apresentados os resultados, portanto é possível ver algumas imagens obtidas e todos os tratamentos realizados e também as análises multifractais realizadas pelo *software* MASS (25) que resultaram na escolha dos parâmetros que são sensíveis ao estresse hídrico, e que portanto, fazem etapa da metodologia apresentada nesse trabalho para o estudo do estresse hídrico na cultura de batata. No capítulo 6 está a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A batata (*Solanum tuberosum*) é originária da Cordilheira dos Andes, na América Latina, e vem sendo consumida pela população dessa localização a mais de 8.000 anos. Por volta de 1570, foi trazida até a Europa através dos colonizadores espanhóis, e por volta de 1620 os europeus levaram até a América do Norte, em todos esses continentes, a batata se tornou um alimento importante para a população (31, 32).

É considerada o terceiro alimento mais consumido no mundo, depois do arroz e do trigo, sendo consumida por mais de um bilhão de pessoas e produzida em mais de 100 países. Ela é fundamental para a alimentação devido ao aumento da população, por exemplo, na China, que é o país que mais consome batata, estima-se que metade do aumento da produção de alimento necessário para a demanda dos próximos 20 anos seja de batata (1).

2.1 BOTÂNICA

Fazendo uma breve revisão sobre a botânica para contextualização, a batata pertence à classe dicotiledônia, à família Solanaceae e ao gênero *Solanum* (33). A Morfologia é apresentada na figura 1, a batateira possui flores e frutos, e o caule cresce até 1 metro. Cada planta pode chegar a produzir até 20 tubérculos, sendo que o número de tubérculos que chegam à maturidade depende da quantidade da umidade e nutrientes no solo, cada tubérculo possui de duas a dez gemas (olhos), dos quais crescem os brotos quando as condições são favoráveis. (34).

O sistema radicular é considerado superficial, geralmente não se aprofunda mais que 40 a 50 cm. A plantação pode ser realizada por semente botânica, nesse caso, forma-se uma raiz pivotante com raízes laterais, como é ilustrado na figura 1. Porém a plantação pode ser realizada pela plantação da batata-semente, nesse caso, as raízes adventícias são desenvolvidas nos nós do caule subterrâneo (31).

Figura 1 - Imagens ilustrativa da planta da batata (figura obtida pelo (35) e adaptada para o português).

2.2 O ESTRESSE HÍDRICO SOBRE A CULTURA DA BATATA

A expectativa do aquecimento global já é cada vez mais aceita pela ciência (2). A preocupação dos efeitos do aquecimento global sobre o seu cultivo já existe a algum tempo, segundo (36), a previsão é de que a temperatura média da superfície global aumente de 1,4 à 5,8°C em 2100.

Já foram realizados estudos sobre efeito do aquecimento global na cultura da batata (8), essa preocupação se dá, em especial, porque ela é sensível à seca quando comparada a outras espécies (37). Segundo (38), a maioria das raízes do sistema radicular da batata está na camada da superfície, o que dificulta a capacidade de explorar umidade no solo, além disso, existe uma preocupação com relação à temperatura do meio ambiente, já que a batata é uma cultura recomendada para temperaturas entre 10 e 30°C (39).

Pelo estudo realizado por (9), estima-se que a produção da cultura de batata no Brasil diminua em torno de 23,2% sem adaptação do mês de plantio e da escolha da espécie de cultivar e em torno de 22,7% com adaptação para o período entre 2040 e 2069 devido ao aquecimento global. Segundo (40), o estresse hídrico aplicado nos estádios vegetativo, tuberização e crescimento de tubérculo provocou uma redução na produção de 70,5%.

Mais especificamente, a umidade do solo tem papel fundamental na produtividade e desenvolvimento da batateira (41), ou seja, o estresse hídrico influencia no desenvolvimento e crescimento de brotos, raízes e tubérculos, também há uma redução na área foliar e o caule atinge uma altura inferior (42). Se por um lado é reduzida a produção de matéria seca, por outro a raiz aumenta de tamanho, a taxa de brotos indica um deslocamento do balanço de crescimento que favorecem as raízes, que apesar do aumento do tamanho tendem a ser mais finas, tudo para que as raízes possam se aprofundar mais em busca de umidade.

Os efeitos do estresse hídrico dependem do tempo de duração desse estresse nas plantas e gravidade. Estresses hídricos transitórios, devidos a uma alta evaporação, podem ter efeitos graves sobre o crescimento da planta, porém temporários, e podem ocorrer mesmo em plantas bem irrigadas devido ao calor ou excesso de sol. Por outro lado, estresse hídrico prolongado ou diminuição gradual da umidade no solo, embora ofereça melhor adaptação para planta, pode também causar efeitos crônicos no crescimento da planta e levar à senescência prematura (43).

Sobre o efeito do estresse hídrico na planta como um todo, podemos apresentar o estudo realizado por (44) sobre o comportamento da planta submetida a estresse hídrico, os parâmetros analisados foram o número de folhas verdes, a altura do caule, o comprimento da folha e a produção de tubérculos de cultivares de batata. Como era esperado, houve uma diminuição na altura do caule, o número de folhas verdes presentes no caule principal das cultivares Krostar e Désirée também diminuiu nos dias 108 e 124 após o plantio, sendo que no final da estação a quantidade de folhas mantiveram-se as mesmas, a diminuição da área folhear contribui para a redução de perda de água (45). Também houve uma diminuição do número de tubérculos para essas cultivares e em relação ao comprimento das folhas foi observada uma diminuição significativa no tamanho das folhas para as cultivares com número de folhas maior que 16.

O estudo realizado por (46) mostrou que todos os parâmetros fisiológicos e agronômicos estudados foram sensíveis à seca. A profundidade da raiz aumentou e quanto aos estolões, o número máximo foi obtido mais cedo e o comprimento foi reduzido.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Os primeiros estudos da Ressonância Magnética Nuclear (RMN) foram realizados independentemente por dois grupos em 1946, Edward Purcell (47), que estudava sólidos na Universidade de Harvard e Felix Bloch (48), que estuda líquidos na Universidade de Stanford. A importância desse estudo para a comunidade científica foi tão importante que em 1952 receberam o prêmio Nobel de Física (49, 50).

Paul Lauterbur, da Universidade de Illinois e Peter Mansfield (51), da Universidade de Nottingham sugeriram a utilização da RMN para obtenção de imagens, as primeiras imagens foram obtidas por Lauterbur (52) em 1972. Essa aplicação proporcionou um grande avanço no diagnóstico da medicina e se desenvolveu rapidamente por se tratar de uma técnica não-invasiva, o resultado dessa grande desenvolvimento foi o Prêmio Nobel de Medicina que foi concedido a Lauterbur (53) e a Mansfield (54) em 2003.

A IRM é uma modalidade de imagem é um método não invasivo e de alta resolução, é muito conhecida e utilizada para diagnósticos médicos, e também para estudos com pessoas ou animais com finalidade para a área da medicina. Apesar de serem menos conhecidos, muitos estudos de IRM são realizados hoje em dia em plantas (55), com aplicações em anatomia e fisiologia em células de plantas, órgãos de plantas e plantas vivas (56-59).

3.1.1 INTERAÇÃO ENTRE ÁTOMO E CAMPO MAGNÉTICO

O texto que segue é baseado nos trabalhos (60, 61).

Existem duas propriedades atômicas que são fundamentais para que aconteça o fenômeno da ressonância magnética: o momento angular intrínseco, ou

spin e o momento magnético μ , que é observado na presença de um campo magnético e que é dado pela equação 1.

$$\mu = \gamma \hbar I \quad (1)$$

onde γ é a razão giromagnética, I é o *spin* nuclear e $\hbar$ é a constante de Planck.

Núcleos atômicos com *spins* meio, ou seja, número ímpar de prótons ou nêutrons e par do outro, apresentam distribuição de carga com simetria esférica e apresentam propriedades de dipolo magnético, o que os torna possíveis de interação na ressonância magnética e são os átomos com núcleos atômicos de *spins* semi-inteiros que são estudados.

Quando um núcleo atômico com *spin* meio (como o do hidrogênio que possui um próton no núcleo) é colocado na presença de um campo magnético B_0 ocorre o desdobramento dos níveis de energia do núcleo devido ao efeito Zeeman. A teoria apresentada aqui nesse capítulo é feita sobre o átomo de Hidrogênio, que é o átomo que sobre o qual realizamos a imagem de ressonância magnética.

A interação entre o momento magnético e o campo magnético resulta na Hamiltoniana de interação Zeeman dada pela equação 2.

$$H = -\mu \cdot B_0 \quad (2)$$

Considerando que o campo magnético está orientado na direção z , a equação anterior pode ser escrita como:

$$H = -\gamma \hbar B_0 I_z \quad (3)$$

cujos autovalores da equação são os níveis de energia possíveis para essa interação, equação 4.

$$E = -\gamma \hbar B_0 m \text{ sendo } m = I, I-1, \dots, -I \quad (4)$$

Como estamos considerando o *spin* $1/2$, para o estudo de ressonância magnética, $I = 1/2$, $-1/2$, para o caso paralelo e antiparalelo, portanto os níveis de energia possíveis são dados pelas equações 5 e 6.

$$E_+ = \frac{\gamma \hbar B_0}{2} \quad (5)$$

$$E_- = -\frac{\gamma \hbar B_0}{2} \quad (6)$$

Esse comportamento pode ser observado na figura 2. A primeira etapa da imagem apresenta átomos de núcleo com *spins* semi-inteiro sem interação com o campo magnético, portanto eles estão orientados aleatoriamente. Com a aplicação

do campo magnético B_0 ocorre a interação desse campo magnético com o momento magnético do núcleo atômico e resultando no desdobramento dos níveis de energia do núcleo.

Figura 2 - Na ausência do campo magnético, os *spins* nucleares estão orientados aleatoriamente. Com a aplicação do campo magnético, ocorre um desdobramento dos níveis de energia do núcleo, sendo que no estado de baixa energia estão os *spins* paralelos ao campo e no estado de alta energia os antiparalelo. Figura retirada de (61).

Para esse sistema, é possível que existam dois níveis de energia, E_- e E_+ , sendo que o primeiro é o nível de baixa energia e o segundo o nível de alta energia. Como a maioria dos *spins* tendem a permanecer no nível de mais baixa, a grande maioria dos *spins* se alinham paralelamente ao campo magnético, apenas alguns ocupam o nível de mais alta energia, resultando no alinhamento antiparalelo ao campo magnético.

A distribuição dos *spins* nesse sistema é dada pela estatística de Boltzmann, cuja relação está apresentada na equação 7.

$$\frac{N_p}{N_a} = \exp\left(\frac{-\gamma\hbar B_0}{K_B T}\right) \quad (7)$$

onde N_p e N_a são os números de *spins* dos núcleos atômicos alinhados, respectivamente, paralelamente e antiparalelamente ao campo, K_B a constante de Boltzmann e T a temperatura da amostra.

O cálculo dessa distribuição mostra que a resultante para uma amostra de 10^6 *spins* é de apenas 1 *spin* em excesso em baixa energia, portanto, trabalhamos com uma pequena etapa de todos os núcleos possíveis para a geração das imagens de ressonância magnética.

Podemos calcular a energia de transição entre os dois níveis de energia através da relação entre as equações 5 e 6:

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad (8)$$

$$\Delta E = E_+ - E_- \quad (9)$$

porém, sabemos que:

$$\Delta E = h\nu = \hbar \omega_0 \quad (10)$$

Portanto, combinando as equações 8 e 10 temos a relação:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (11)$$

ω_0 é conhecida como a frequência de Larmor, e é muito importante para a ressonância magnética, pois é a frequência de excitação dos *spins* nucleares entre os níveis energéticos. Para o nosso caso, o aparelho de ressonância magnética possui um campo de 2T e utilizamos a excitação do núcleo do átomo de Hidrogênio, por possuir *spin* nuclear semi-inteiro e por ser abundante na planta, para esse caso, a razão giromagnética ($\gamma = \gamma/2\pi$) para o ^1H é de $42,58 \text{ MHz/T}$, portanto, a frequência de excitação utilizada é de aproximadamente 85,2 MHz, ou seja, é um pulso de rádio frequência (RF).

O *spin* pode ser tratado classicamente na interação com o campo magnético, que é uma forma mais intuitiva e de entendimento mais fácil. A partir dessa consideração, o momento magnético do *spin* está na direção do seu eixo devido ao movimento do *spin*, como é ilustrado na figura 3, quando é aplicado um campo magnético B_0 o *spin* precessiona em torno de B_0 devido ao torque sofrido pelo momento magnético, equação 12.

Figura 3 - Núcleo atômico pela visão clássica. O *spin* possui um momento magnético intrínseco, μ_n . Quando é aplicado um campo magnético B_0 o núcleo adquire um movimento de precessão em torno desse campo. Figura retirada de (62).

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}_0 \quad (12)$$

como o torque está relacionado com o momento angular através da equação 13.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (13)$$

obtemos a relação,

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times (\gamma \vec{B}_0) \quad (14)$$

que é a equivalente à equação do movimento de precessão que possui uma frequência de movimento dada por:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (15)$$

ou seja, a frequência de Larmor.

Esse estudo sobre o movimento do *spins* foi realizado de forma isolada, ou seja, considerando apenas um *spins* interagindo com um campo magnético. A partir de agora, veremos o comportamento de um conjunto de *spins* no campo magnético.

Portanto, veremos o efeito que o campo magnético causa no sistema como um todo. Aplicando um campo magnético B_0 na direção longitudinal temos um vetor magnetização $\vec{M}$ que é a resultante da soma vetorial de todos os momentos magnéticos dos núcleos atômicos, como é apresentado na equação 16.

$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i \quad (16)$$

Apesar da precessão dos prótons ter a mesma frequência, frequência de Larmor, esses não são coerentes, ou seja, estão defasados um em relação ao outro. O resultado desse fenômeno é que a magnetização transversal é aleatória, portanto, a soma vetorial dessa componente é uma resultante nula.

$$\vec{M}_T = \vec{0} \quad (17)$$

Onde $\vec{M}_T$ é a componente transversal do vetor magnetização. Sabendo disso, podemos considerar que:

$$\vec{M}_L = \vec{M}_0 = \sum_i \vec{\mu}_i \quad (18)$$

Onde $\vec{M}_L$ é a componente longitudinal do vetor magnetização. Essa decomposição do vetor magnetização pode ser vista na figura 4.

Figura 4 - Vetor magnetização resultante M_0 . A componente da magnetização transversal é zero devido ao comportamento aleatório dos *spins* nessa direção, portanto, a componente da magnetização longitudinal é igual a M_0 . Figura retirada de (62).

Apesar de existir o vetor magnetização na presença do campo magnético B_0 , esse campo é estático, portanto não conseguimos informações somente com esse campo. Para isso, devemos aplicar outro campo magnético, para que interaja com o vetor magnetização e nos dê informações.

3.1.2 IMAGEM DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Para o estudo da interação de mais um campo magnético, faremos uma introdução ao sistema de coordenadas girantes, um sistema de coordenadas que permite a relação entre dois sistemas, um em repouso e outro em movimento girante sobre o próprio eixo.

O referencial em movimento é o Referencial Girante (RG), a origem dos eixos de coordenadas desse referencial deve coincidir com a origem dos eixos de coordenadas do Referencial do Laboratório (RL), consideramos os versores cartesianos no RL sendo $\hat{x}$, $\hat{y}$ e $\hat{z}$ e os versores cartesianos do sistema de coordenadas do RG como $\hat{x}'$, $\hat{y}'$ e $\hat{z}'$. Para facilitar o estudo, adotaremos o eixo $\hat{z}$ e $\hat{z}'$ como coincidentes, e a frequência Ω como sendo a frequência de rotação do RG em relação ao RL.

O vetor magnetização pode ser escrito em coordenadas do RG, como é apresentado na equação 19.

$$\vec{M} = M_x \hat{x} + M_y \hat{y} + M_z \hat{z} \quad (19)$$

A variação temporal de um vetor genérico $\vec{V}$ pode ser escrita como:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{V} \quad (20)$$

onde Ω é a velocidade angular de $\vec{V}$. Fazendo uma variação temporal do vetor magnetização, como apresentado na equação 19, temos como resultado a relação para o campo efetivo atuando na magnetização no sistema RG, equação 15.

$$\left(\frac{d\vec{M}}{dt} \right)_{RG} = \vec{M} \times (\gamma \vec{B}_{ef}) \quad (21)$$

onde,

$$\vec{B}_{ef} = \vec{B}_0 + \frac{\vec{\Omega}}{\gamma} \quad (22)$$

sendo que $\vec{\Omega} = -\omega_z \hat{z}$.

O segundo campo magnético externo, chamaremos de $\vec{B}_1$, é linearmente polarizado e oscilante no tempo. Esse campo representa o pulso de RF.

Podemos dividir esse campo magnético em duas componentes circularmente polarizadas, ambas com amplitude B_1 e girando em sentidos opostos, como pode ser observado na figura 5.

Figura 5 - Campo magnético campo oscilante e linearmente polarizado decomposto em duas componentes circularmente polarizadas, com amplitude B_1 , e girando em sentidos opostos.

Por serem circularmente polarizados, os campos $\vec{B}_1^+$ e $\vec{B}_1^-$, respectivamente de sentido horário e anti-horário, podem ser descritos da seguinte forma:

$$\vec{B}_1^+ = \frac{1}{2} B_1 (\cos \omega t \hat{x} - \sin \omega t \hat{y}) \quad (23)$$

$$\vec{B}_1^- = \frac{1}{2} B_1 (\cos \omega t \hat{x} + \sin \omega t \hat{y}) \quad (24)$$

Como uma das componentes gira no mesmo sentido de precessão do vetor magnetização, enquanto a outra gira no sentido oposto, próximo da condição de ressonância, a componente de frequência contrária pode ser desprezada. Escrevendo os campos circularmente polarizados no RG, temos:

$$\vec{B}_1^+ = \frac{B_1}{2} \hat{x}' \quad (25)$$

$$\vec{B}_1^- = \frac{B_1}{2} (\cos 2\omega t \hat{x}' + \sin 2\omega t \hat{y}') \quad (26)$$

Lembrando que o único campo da decomposição de $\vec{B}_1$ que atua sobre os núcleos é a componente $\vec{B}_1^+$, podemos concluir que o campo efetivo dado pela equação 27, na presença do campo oscilante e no RG é:

$$\vec{B}_{ef} = \left(B_0 - \frac{\omega_z}{\gamma} \right) \hat{z}' + \frac{B_1}{2} \hat{x}' \quad (27)$$

Se o ângulo de rotação do RG for igual à frequência de Larmor, equação 11, não existirá componente do campo magnético efetivo no eixo $\hat{z}'$, portanto, o campo sentido será somente o aplicado no eixo $\hat{x}'$. Portanto, no RG, o vetor magnetização precessionará em torno do campo efetivo com frequência dada por:

$$\omega_1 = \gamma B_1 \quad (28)$$

Vale frisar que o campo efetivo resultante para esse caso está na direção $\hat{x}'$, portanto esse será o eixo de precessão do vetor magnetização.

O ângulo entre o vetor magnetização e o eixo z é chamado ângulo de *flip*, figura 6, e pode ser determinado pela seguinte relação:

$$\theta = \omega_1 \tau = \gamma B_1 \tau \quad (29)$$

onde τ é o tempo de duração do pulso do campo RF. Portanto, esse ângulo pode ser controlado pela intensidade do pulso de RF e pelo tempo de duração.

Portanto, se o pulso aplicado for de $\theta = \pi/2$, o eixo do vetor magnetização deixa de ser o z' e passa a ser o y' , para esse caso temos o pulso de excitação. Caso $\theta = 2\pi$ o vetor magnetização, deixa estar sobre o eixo z' e passa para o eixo $-z'$, que é chamado de pulso de inversão, figura 6.

Figura 6 - A aplicação do RF no Referencial Girante resulta em um campo efetivo na direção de x' . O ângulo entre o eixo z' e o vetor magnetização, θ , é chamado de ângulo de *flip*.

Podemos captar esse movimento do vetor magnetização através do sinal de RMN. A amostra, que está inserida em um campo magnético B_0 e possui um campo magnético de mesma direção desse campo, é colocada dentro de uma bobina que gera o pulso de RF de excitação, como já foi tratado anteriormente. Esse pulso, quando aplicado sobre a amostra, leva toda a magnetização para o plano transversal, cuja precessão resultará em uma variação de fluxo magnético na bobina gerando uma força eletromotriz que pode ser medida.

Após o pulso de RF, o único campo magnético presente é o campo B_0 , portanto a magnetização começa a voltar ao seu estado de equilíbrio gerando um sinal conhecido como *Free Induction Decay* (FID), figura 7.

Figura 7 - Sinal de FID gerado após o pulso de RF.
Figura retirada de (62).

Esse decaimento é conhecido como relaxação, e dois processos são responsáveis para que isso ocorra, um é a relaxação longitudinal ou relaxação *spin-rede* e o outro é a relaxação transversal ou *spin-spin*.

A relaxação longitudinal ocorre pela dissipação de energia dos núcleos no próprio meio atômico. O tempo de relaxação característico é chamado de T_1 , que é o tempo necessário para que 63% da componente longitudinal da magnetização retorne à condição de equilíbrio.

O decaimento de relaxação transversal. Ele acontece pois os núcleos começam a perder coerência de fase devido à interações com núcleos vizinhos portanto, a magnetização transversal é rapidamente reduzida. Esse tempo de relaxação é chamado de T_2 e é o tempo para que 36% componente transversal da magnetização retorne à condição de equilíbrio.

Na realidade, o decaimento da componente transversal efetivamente observado é caracterizado por T_2^* (T_2 estrela), que, além das interações com núcleos vizinhos, também é caracterizado pelo campo magnético estático.

O valor do T_2^* é menor do que o T_2 devido a interação com o campo magnético estático. Portanto, os tempo de relaxação podem ser caracterizados por $T_1 > T_2 > T_2^*$.

Materiais ferrosos, como os encontrados no solo, fazem com que a susceptibilidade magnética local aumente o campo magnético estático, portanto o tempo de relaxação observado, T_2^* fica bem menor, resultando em ausência dessas etapas nas imagens.

O comportamento do vetor magnetização para os tempos de relaxação T_1 e T_2 são apresentados na figura 8.

Figura 8 - Tempo de relaxação para A) componente longitudinal e B) componente transversal da Magnetização. Figura retirada de (61).

Quando há a aplicação do pulso (no caso $\pi/2$), e o vetor magnetização deflete para o plano xy, ele interage com a vizinhança, provocando pequenas alterações no campo magnético local. O resultado disso é que os *spins* adquirem frequências ligeiramente diferentes, ou seja existe uma perda de coerência de fase.

Essa coerência pode ser recuperada através da aplicação de um pulso de 180° , o que induz outro tipo de sinal na bobina receptora, conhecido como *spin-echo*, ou eco de *spin*, figura 9.

Figura 9 - A aplicação do pulso de RF de $\pi/2$ gerou um FID, provocando perda de coerência. Com a aplicação do pulso de π , a coerência foi recuperada, gerando um sinal de *spin echo*. Figura retirada de (93).

O tempo entre a aplicação do pulso de $\pi/2$ e a obtenção do eco, é o Tempo ao Eco (TE). E o tempo entre dois pulsos de $\pi/2$, ou seja, o tempo de repetir uma sequência, é o Tempo de Repetição (TR).

Para se obter IRM, é realizada uma codificação espacial, através de campos magnéticos adicionais que variam espacialmente, são os gradientes de campo magnético. Os campos estão na mesma direção do campo principal, porém as

amplitudes variam linearmente nas direções x, y, z, como é apresentado na figura 10.

Figura 10 - Variação do campo de gradiente nas direções: A) direção x, B) direção y e C) direção z. Figura retirada de (62).

Cada um desses campos são gerados por bobinas de gradiente diferentes ortogonais entre si, e possuem diferentes funções.

O gradiente de seleção (G_z), gera o campo que varia na direção z, portanto tem a função de selecionar a fatia que será excitada. Pois, como pulso de RF excita os de *spins* que estão em ressonância com sua frequência, ele só excitará a fatia do campo z que possui essa frequência.

O gradiente de fase (G_y), gera o campo que varia na direção y, portanto ele causa uma defasagem na magnetização dentro do plano xy, de modo que a fatia selecionada (excitada), seja dividida em regiões menores com diferentes fases de magnetizações, mas em cada pequena região os *spins* possuem a mesma fase.

E o gradiente de leitura (G_x), gera o campo que varia na direção x, portanto ele consegue informações diferentes dos *spins* em cada ponto do espaço, devido a sua frequência angular de precessão. A partir desse gradiente é gerada a imagem.

Essa variação no camponas direções x, y e z, provoca uma variação no campo magnético de acordo com o Gradiente (G):

$$\vec{B}(r) = \vec{B}_0 + \vec{G} \cdot \vec{r} \quad (30)$$

Substituindo a variação do campo magnético na equação 11, temos a variação espacial da frequência de Larmor:

$$\vec{\omega}(r) = \gamma(\vec{B}_0 + \vec{G} \cdot \vec{r}) \quad (31)$$

A densidade de magnetização de um volume dr, na presença desse campo de gradiente, possui o seguinte comportamento:

$$dm = M_0 e^{i\vec{\omega} \cdot \vec{r}} e^{-t/T_2} d\vec{r} \quad (32)$$

Portanto, o sinal resultante desse volume é dado por:

$$M(t) \propto \int_r M_0(r) e^{i\gamma(\vec{B}_0 + \vec{G} \cdot \vec{r})t} e^{-t/T_2} d\vec{r} \quad (33)$$

Considerando o RG, podemos descartar $e^{i\gamma \cdot \vec{B}_0 \cdot t}$. Além disso, considerando T_2 constante e definindo uma nova variável:

$$\vec{k}(t) = \gamma \cdot \vec{G} \cdot \vec{r} \quad (34)$$

Temos a magnetização no espaço do domínio das frequências. Após a aplicação da transformada de Fourier, temos o sinal de magnetização:

$$M(t) \Rightarrow S(k(t)) \cong \int M_0(r) e^{i\vec{k}(t) \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (35)$$

3.1.3 SEQUÊNCIA *SPIN ECHO* (SE)

Como a sequência utilizada nesse trabalho trata-se de uma *Spin Echo* (94), será apresentado o conceito dessa sequência.

Para se obter a imagem, os passos apresentados acima (como os gradientes e pulso de RF) devem ser realizados sincronizadamente.

A figura 11 representa o diagrama da sequência. A seguir, está a citação de (60) sobre a explicação da sequência.

Figura 11 - Diagrama da sequência SE e a trajetória no espaço k. Figura retirada de (60).

“Na sequência SE, um determinado plano é selecionado com um pulso de excitação seletivo, cuja duração, na presença de um gradiente de seleção (G_s), faz com que os *spins* comecem a se espalhar mesmo antes de alcançarem o plano

transversal. Isso é corrigido com a aplicação, logo após o pulso de excitação, de um segundo gradiente, chamado gradiente de refocalização, invertido com relação ao primeiro, cuja área seja metade da área do gradiente G_S .

Nessa condição, os *spins* estão em máxima coerência de fase, o que equivale a origem (O) no espaço k. Aplica-se, então, os gradientes de codificação de fase (G_P) e frequência (G_R) que fazem com que a magnetização evolua, percorrendo a trajetória $\overline{OA}$. Em seguida, o pulso de inversão inverte as componentes da magnetização, o que equivale, no espaço k, a percorrer a trajetória $\overline{AB}$. Finalmente, sob a presença do gradiente de leitura, é feita a aquisição do sinal, quando a magnetização, no espaço k, percorre a trajetória $\overline{BC}$.”

3.2 TEORIA MULTIFRACTAL

O texto a seguir foi baseado na referência (64). É apresentada uma breve introdução sobre a teoria multifractal para contextualização do trabalho (65).

A geometria fractal vem sendo estudada desde a sua criação, nos anos 60, por Benoit Mandelbrot (66). Ela estuda as formas da natureza que não podem ser estudadas pela geometria euclidiana, que possui dimensão inteira. Na geometria fractal, a dimensão é fracionada e existe a propriedade de auto-similaridade, ou seja, uma etapa do objeto que se assemelha ao objeto todo, em vários níveis, tanto micro quanto macro.

Um exemplo de fractal é a curva triádica de Koch, apresentada na figura 12, onde um segmento unitário, é dividido em três partes iguais, resultando em quatro novos segmentos e cada um desses segmentos também é dividido em três partes e assim por diante. Esse processo se repete várias vezes, caracterizando o sistema fractal.

Figura 12 - Curva triádica de Koch. Figura obtida da referência (64) e original de (67).

Uma técnica para análise fractal é conhecida como *box-counting*, no qual as imagens são divididas em grades ou malhas. O número de partes em que o lado do quadrado é dividido é chamado de L (escala), e o número de quadrados, ou caixas, que contém informação da matéria da imagem é chamado de $N(L)$ (boxes). Utiliza-se diferentes valores de escala para a análise, como é apresentado na figura 13.

Figura 13 - Técnica de *box-counting* aplicada na imagem. Para a análise ser realizada, é necessário que tenham vários valores de escala. Figura retirada de (64).

Utilizando os diferentes valores de escala e as respectivas quantidades de boxes, fazemos um gráfico do logaritmo dessas variáveis para obter a informação da dimensão fractal do sistema, figura 14.

Figura 14 - Valores de escala e dos respectivos *boxes*. O coeficiente angular do gráfico logarítimo com essas informações é a dimensão fractal. Figura retirada de (64).

Portanto, vemos que a dimensão fractal fornece informações apenas geométricas, pois a análise é realizada considerando os *boxes* que possuem matéria. Por essa técnica não temos informação de concentração de matéria, por exemplo, figura 15. Essas informações são obtidas quando utilizamos a dimensão multifractal.

Figura 15 - Imagem do sistema poroso em solo. Pelo método fractal, os boxes com pouca e muita matéria são tratados igualmente, temos apenas a informação geométrica. Na técnica multifractal, temos a informação de concentração. Figura retirada de (64).

Pela análise multifractal, temos nos boxes as informações de probabilidade de matéria, e quanto menor a escala, mais precisa é essa informação, figura 16.

Figura 16 - a) Imagem ser analisada pela técnica multifractal; b) os *boxes* contém a probabilidade de matéria, portanto, além da informação geométrica, também temos a informação da concentração de matéria; c) quanto menor a escala mais precisa é a informação. Figura retirada de (64).

Como o sistema abordado nesse trabalho possui alta concentração de métrica (matéria), a abordagem fractal descreve melhor esse sistema.

A equação básica da teoria fractal relaciona o número e o tamanho dos objetos fractais:

$$N(L) \sim L^{-D} \quad (36)$$

onde D é a dimensão fractal.

E a probabilidade de que exista matéria dentro de um determinado *box* é dada por:

$$P_i(L) = \frac{N_i(L)}{N_T} \quad (37)$$

Onde N_T é o total de *boxes* do sistema. Substituindo a equação 36, temos que a a probabilidade de existência de matéria, para sistemas heterogêneos ou não uniforme, caso multifractal, é dada pela equação:

$$P(L) \sim L^\alpha \quad (38)$$

Onde α é o expoente “Lipschitz-Holder” ou expoente de singularidade, determina a energia interna do sistema, ou seja, que caracteriza áreas com altas ou

baixas concentrações de massa. O número de quadrados $N(\alpha)$ é encontrado escalar como:

$$N(\alpha) \sim L^{-f(\alpha)} \quad (39)$$

Onde espectro multifractal, $f(\alpha)$, é a dimensão fractal do conjunto de *boxes* com singularidade α , e determina a entropia do sistema, portanto, caracteriza a distribuição espacial do sistema.

As diferentes dimensões multifractais associadas à geometria do sistema são chamadas de dimensões generalizadas, D_q , onde os momentos q estão relacionados à singularidade do espectro. São obtidas pela seguinte equação:

$$D_q = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(L)} P_i^q(L)}{\log L} \quad (40)$$

A dimensão onde $q=0$, ou seja, D_0 , caracteriza um sistema fractal, portanto, fornece informações sobre a geometria do sistema.

A dimensão D_1 , está relacionada com a entropia do sistema, portanto quantifica o grau de desordem da matéria. Para D_1 próximo de 1, tem-se um sistema com distribuição uniforme, e para D_1 próximo de 0, tem-se um sistema bastante irregular.

A dimensão D_2 está associada ao grau de correlação da matéria com a “vizinhança”, ou seja, da matéria com a próxima matéria que está próxima.

Essas dimensões se relacionam da seguinte forma:

$$D_0 \geq D_1 \geq D_2 \quad (41)$$

Para $q > 1$, temos valores relacionados às métricas (matérias) presentes nas imagens, ou seja, para as maiores singularidades, e para $q < 1$, são caracterizadas as áreas com menores singularidades.

Em $q=1$, $f(\alpha)$ é igual a α essa é a média do sistema, o ponto $q = 0$ é o valor máximo, figura 17. Quanto maior o $\Delta\alpha$ maior a entropia, heterogeneidade, do sistema.

Figura 17 - Espectro multifractal. Figura retirada de (64).

4 MATERIAS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A batata utilizada nos experimentos é a cultivar Ágata, que foi originada na Holanda em 1990 através do cruzamento de Böhm52/72 e Sirco. Essa variedade é conhecida pela brotação rápida e alta produtividade por isso que em 1999 já estava registrada no Brasil e em nove países europeus. A participação dessa variedade na produção brasileira só vem crescendo desde então (68).

Os minitubérculos (figura 18) foram colhidos em abril de 2010 e cedidos gentilmente pelos colaboradores da ABBA. Esses possuíam diâmetro aproximado de 1,5 cm, e foram conservados a aproximadamente 8°C.

Figura 18 - Batatas utilizadas nas imagens da terceira etapa do experimento. Os minitubérculos têm aproximadamente 1,5 cm de diâmetro.

Inicialmente as amostras de batata foram plantadas em recipientes cedidos pelo CIP (Centro Internacional de La Papa), de formato cônico com altura de 13,8cm, diâmetro superior de 8,5cm e diâmetro inferior de 6,2cm, como é apresentado na figura 19.

Figura 19 - Recipiente fornecido pelo CIP e utilizado nas imagens preliminares do estudo.

Porém, foi notado que a parte do recipiente que mais importava para a análise (que é a base onde as raízes irão crescer e no qual o estudo será realizado) poderia ser maior, melhorando a qualidade do trabalho.

Portanto, foram criados recipientes 14 recipientes na Oficina Mecânica do IFSC de formato cilíndrico, com altura de 12,70 cm e diâmetro de 7,20 cm. Cada recipiente foi identificado com uma letra do alfabeto (de A a O) para distinguirmos as amostras, como é mostrado na figura 20.

Figura 20 - Recipientes no qual se cultivaram as batatas para o estudo. A) visão frontal dos recipientes; B) visão de cima.

Para as imagens testes em duas dimensões, utilizou-se a sequência MSSE (*multi slice spin eco*). As imagens foram realizadas no antigo sistema de aquisição de imagens do laboratório (Apollo – Tecmag).

Em dezembro de 2008 esse sistema foi substituído e as imagens utilizadas nas análises foram realizadas no novo sistema, o Avance III / MRI – Bruker / Biospec. Um sistema de banda larga de 2 a 400MHz, com dois canais de transmissão, ^1H e X, quatro canais de recepção (^1H ou X, qualquer combinação), aquisição paralela em 4 canais, fontes de gradientes de 300V/200^a, 12 canais de

shimming, gradientes de 16 Gauss/cm, dois amplificadores de RF de 1 (1H) e 2 (X) kW.

O aparelho de Ressonância Magnética utilizado foi o mesmo nos dois casos, o magneto supercondutor de 2T horizontal da *Oxford Instruments*, cujo modelo é 65310HR e a bobina de radio-frequência utilizada foi desenvolvida no próprio laboratório por (63).

4.2 SISTEMA DE VÁCUO

Como a raiz é o objeto de estudo das imagens e ela é muito fina suspeitou-se que efeitos de susceptibilidade magnética devido ao oxigênio presente no ar pudessem interferir significativamente nas imagens (70). Para evitar esses possíveis efeitos, desenvolvemos uma câmara na qual é retirado o ar e injetado nitrogênio. Esse sistema é composto por uma bomba de vácuo, que quando conectada à câmara que continha a amostra gerava uma pressão interna de aproximadamente 10^{-2} Torr. Após alguns segundos com essa pressão dentro da câmara era injetado gás de Nitrogênio por uma mangueira, e continuava a ser injetado durante todo o período da realização da imagem.

Na figura 21 tem-se a câmara de vácuo. Nesse caso, a câmara está fechada e com o recipiente vazio dentro. Pode-se observar que o recipiente fica fixo dentro da câmara devido ao encaixe da tampa posterior ao fundo e à elevação na parte interna da câmara.

Figura 21 - Câmara fechada com o recipiente vazio dentro. A parte mais alta antes do lugar de encaixe do recipiente na câmara possibilita que ele fique imóvel.

Fizemos imagens teste para ver qual o efeito que o sistema de vácuo e inserção de Nitrogênio tem nas imagens, foi observado que não houve mudança visual nas imagens, como é visto na figura 22. A primeira imagem (figura 22 A), foi realizada normalmente, com o ar ambiente, e a figura 22B, utilizando o sistema a vácuo e quebra por gás Nitrogênio.

Comparando as imagens, não é possível observar nenhuma melhoria na definição do contorno da batata pela ausência dos efeitos de susceptibilidade magnética. Portanto não há efeitos significativos de melhora nas imagens com esse sistema.

A partir desse resultado, não utilizamos essa alternativa.

Figura 22 - Comparação das imagens feitas com e sem o vácuo e o nitrogênio. A) a imagem foi realizada com o ar do ambiente; B) a imagem foi realizada após ser feito o vácuo e ser introduzido o nitrogênio na câmara. Nessa comparação é visualmente notável que não há melhorias na definição das imagens.

4.3 SOLUÇÃO NUTRITIVA

As plantas precisam de alguns nutrientes para seu desenvolvimento. Como estamos trabalhando em um sistema hidropônico (20, 71, 72), não se utilizou o solo como meio de crescimento das raízes e sim um substrato (73), que no caso desse trabalho é a areia.

Como o substrato não possui os nutrientes necessários para o plantio, (21) foi necessário fazer uma solução nutritiva (Newton Granja, informação pessoal).

Foi observado, através da literatura, que a composição da solução nutritiva pode ter pequenas variações de quantidade de elementos químicos, mesmo quando aplicada para mesmos tipos de cultivares. Segundo (74), não existe uma solução nutritiva única nem melhor do que outras no cultivo de determinadas variedades, porém pode-se fazer ajustes para otimizar o crescimento e a qualidade da cultura.

A tabela a seguir mostra uma comparação entre a quantidade de nutrientes que utilizamos e os valores das quantidades encontrados na literatura.

Tabela 1 - Concentração de elementos atômicos nas soluções nutritivas encontradas na literatura e utilizada nesse experimento. A referência "atual" da tabela foi a concentração utilizada nesse experimento.

Concentração Trabalho (mg/L)		Referências							
		(75)	(76)	(77)	(78)	(79)	(80) -S1	(80) -S2	Média ¹
Ca	233,66	288,72	142,00	302,00	162,00	21,00	78,70	152,80	163,89
N	315,35	33,83	198,00	360,00	55,30	37,94	180,00	172,00	148,15
P	48,32	7,93	39,00	12,00	40,00	4,60	45,00	41,90	27,20
K	255,79	234,60	183,00	298,00	295,00	99,60	270,00	239,10	231,33
Mg	23,41	41,31	38,00	37,80	40,00	8,40	20,00	14,50	28,57
S	31,22	13,09	52,00	58,5	64,00	2,80	26,60	64,00	40,14

Em (75), o sistema hidropônico utiliza como substrato areia e foram utilizadas amostras de minitubérculos da cultivar Macaca.

As referências de (76) e (77) foram utilizadas por (81) com a finalidade de avaliar a adequação de diferentes soluções nutritivas aos sistemas hidropônicos desenvolvidos. Nesse trabalho, foram utilizados sistemas hidropônicos em calhas de PVC e telha de fibrocimento, com as cultivares de batata Baronesa e Eliza.

Na referência de (78) foram utilizados três tipos de sistema hidropônico: aeropônico (sistema no qual as plantas se desenvolveram em uma câmara (caixa) de fibra-de-vidro), DFT (baseado na interpolação de duas canaletas de fibrocimento trapezoidais) e NFT (constituído de duas calhas sobrepostas) com as cultivares Agata e Monalisa. Em (79), foram utilizados dois tipos de substrato: areia e orgânico Plantimax® com os cultivares clones SMIJ 461-1 e SMIJ 319-1.

No trabalho de (80), foram utilizadas soluções nutritivas diferentes para a avaliação da adequação das soluções nutritivas, são apresentadas na tabela 1 como

¹ A média foi calculada sobre os valores apresentados pelas referencias da tabela

referência duas soluções: S1 (Solução 1) e S2 (Solução 2). Os sistemas hidropônicos desse trabalho são as calhas de PVC articuladas e as telhas de fibrocimento e foi utilizada a cultivar Pérola.

Através da tabela 1, comprova-se que não existe um valor exato de concentração da solução nutritiva, e que o valor que estamos utilizando está dentro do esperado em relação às outras referências encontradas na literatura. Mesmo para os casos no qual a concentração está mais distante das médias das referências (como no caso do elemento químico Ca), ainda assim está dentro do esperado em relação à literatura, como quando comparado com (75).

4.4 PARÂMETROS DAS IMAGENS

A fim de evitar a interferência nas imagens dos elementos paramagnéticos presentes na terra (69), utilizamos outro tipo de substrato para plantarmos as sementes. Portanto, foram realizadas imagens preliminares de ressonância magnética das batatas plantadas em diferentes tipos de substrato para que vissemos qual era o mais apropriado para esse estudo.

Durante o período de 10 de julho de 2008 a 26 de outubro de 2008 foram realizadas as imagens preliminares de ressonância magnética das amostras, para as imagens em duas dimensões, pela seqüência MSSE.

Uma análise dos parâmetros utilizados para essas imagens resultou na utilização do valor de TR de 1000ms e TE de 13,2ms. A matriz bidimensional nesse caso foi de 256x256 pontos e o FOV de 80x80mm², resultando em uma imagem com resolução de 313x313µm².

Começamos o estudo com 3 recipientes, cada um com um tipo de substrato diferente, são eles: areia branca, musgo natural e musgo verde. A figura 23 mostra a foto das amostras plantadas nos três tipos diferentes de solo, na foto da figura 23A está a amostra utilizando a areia branca como substrato, na figura 23B é o musgo natural e na figura 23C o musgo verde. Na figura 24 apresenta-se as imagens 2D realizadas com essas amostras.

Figura 23 - Foto dos recipientes com diferentes solos: A) Areia Branca; B) Musgo Natural; C) Musgo Verde. Através desse estudo pôde-se escolher o melhor solo para realizarmos as imagens.

Figura 24 - Imagens de ressonância magnética realizadas no dia 11/08/2008 em diferentes solos: A) Areia Branca; B) Musgo Natural; C) Musgo Verde. Pode-se observar que a imagem cujo substrato menos interfere na imagem é a A, portanto, a areia branca foi utilizada na realização dos experimentos.

Como podemos observar na figura 24, o musgo natural (figura 24B) e o musgo verde (figura 24C) dificultam a observação das pequenas raízes das batatas, pois o próprio solo aparece nas imagens, podendo ser confundido com raízes bem finas de batata. Na imagem com areia (figura 24A), vemos somente a imagem da batata, e nada mais, o que facilita a observação das raízes.

Portanto, através dessas imagens preliminares escolhemos como solo mais apropriado para as imagens a areia branca.

Além da escolha do substrato, deve-se utilizar a imagem mais apropriada para os estudos.

Como o objeto do estudo das imagens é a análise do crescimento tridimensional das raízes e é necessário que sejam imagens rápidas devido ao grande número de amostras. Inicialmente foram feitos testes nas sequências de

FLASH (*Fast Low Angle Shot*) 3D (82, 83) e Turbo RARE (*Rapid Acquisition Relation Enhanced*) 3D (84) por serem imagens 3D e de curto tempo de aquisição.

Variou-se os valores dos parâmetros como TR, TE, matriz e média para otimizar a qualidade das imagens. Como resultado, a melhor imagem obtida foi para a sequência Turbo RARE 3D, figura 25, ponderada por T2.

Figura 25 - Melhor imagem obtida para os dois tipos de sequência: A) FLASH 3D e B) Turbo RARE 3D. A imagem FLASH mostrou-se bem mais granulosa, portanto utilizamos a Turbo RARE.

Portanto, a sequência utilizada foi a Turbo RARE 3D, que ainda foi otimizada depois das imagens apresentadas na figura 25. Os parâmetros otimizados para a sequência utilizada nos experimentos foram de TE=100,09ms e TR =1000ms. O FOV utilizado considerando o tamanho limitante do recipiente na direção XY e otimizando o tamanho necessário para o crescimento das raízes no eixo Z dentro do período no qual a aquisição foi realizada foi de 70x70x70 mm³, já a matriz utilizada foi de 256x139x128 pontos resultando em uma resolução de 273x504x547µm³.

Para deixar a imagem homogênea, foi realizada a interpolação nas imagens, portanto, a matriz que na realização das imagens era de 256x139x128 pontos passou para 256x256x256 pontos.

A grande dificuldade da otimização dos parâmetros foi conseguir conciliar o tempo pequeno de duração da aquisição das imagens, já que teríamos 14 amostras para fazer imagem durante o dia, e a grande resolução que as imagens deveriam ter, já que as raízes a serem estudadas são muito finas e são bem pequenas principalmente quando comparadas com o tamanho do FOV (pois a imagem deve

ser feita em todo o recipiente para podermos analisar o crescimento da raiz com o tempo).

4.5 METODOLOGIA

Definido que não usaríamos o sistema de vácuo, tendo escolhido o substrato e elaborado a solução nutritiva e todos os recipientes prontos para cada amostra elaborou-se a metodologia para aquisição das imagens do trabalho.

Realizou-se uma breve análise de acordo com a técnica desenvolvida por Souza-Dias *et al.* (85) que consistiu em cultivar somente os brotos (sem a batata). Esta técnica possibilitaria que a amostra ocupasse menos espaço no recipiente (o espaço que normalmente seria ocupado pela batata agora passaria a ser ocupado somente pelo broto), resultando em mais espaço para o crescimento das raízes. Porém, nessa nova técnica, as raízes não cresceram por muito tempo, possivelmente devido à pequena quantidade de nutrientes que existe nessa técnica.

Portanto, esse procedimento foi desconsiderado. Como foi realizada uma breve análise com essa técnica e não um estudo profundo, não podemos afirmar com certeza o motivo da ineficiência da técnica para o estudo de raízes.

Com a areia como substrato, o sistema apresentado é hidropônico, já que o cultivo em substrato que não contenha nutrientes caracteriza um cultivo hidropônico. Portanto, foi feita uma solução nutritiva para irrigação.

As plantas foram irrigadas todos os dias uma vez ao dia, no qual se alternava a solução nutritiva e água entre um dia e outro para que se evitasse um excesso de nutrientes nas plantas (86). A quantidade dessa reposição de água diária é a mesma devido à perda por evapotranspiração, portanto, a concentração de água em cada amostra se mantinha aproximadamente constante a cada dia. A reposição de água foi realizada da seguinte forma: todos os dias pesavam-se os recipientes com as amostras, a quantidade de massa perdida de um dia para o outro era repostada em água.

Variamos a concentração de água em cada amostra, como mostra a tabela a seguir.

Tabela 2 - Na primeira coluna, encontra-se a porcentagem de água, com relação ao substrato, existente em cada amostra. E na segunda coluna estão as letras na qual os recipientes foram identificados, correspondentes ao percentual de água.

%Água	Identificação dos recipientes
4	A, B, C, D
5	E, F, G, H
6	I, J, L
8	M, N, O

Portanto, 4 das amostras tinham concentração de 4% de água, outras 4 tinham 5% de água, 3 amostras continham 6% de água e as 3 últimas continham 8% de água. O valor de 8% de água é considerado ideal para a plantação nessas condições, portanto, todos os outros casos são classificados como estresse hídrico. A concentração de água de 8% para o substrato utilizado foi obtida por correspondência interna no CIP.

Realizamos imagens de ressonância nessas amostras por aproximadamente 18 dias, devido a uma limitação do experimento. Como o magneto é pequeno, pois foi projetado para pequenos animais, o recipiente onde foi plantada a amostra também teve que ser pequeno. Portanto, com o passar dos dias as raízes cresciam até a borda do recipiente e mudavam a direção de crescimento, ou seja, começavam a crescer ao redor do recipiente. Portanto, as imagens em cada amostra foram feitas, aproximadamente durante 3 semanas, pois depois disso as raízes apresentavam esse comportamento, como é mostrado na figura 26.

Figura 26 - Imagem teste feita em uma batata no qual as raízes cresceram até a borda do recipiente. A) visão lateral B) visão de cima.

Ao término das imagens, repetimos o trabalho mais duas vezes com outras batatas sementes, resultando em um experimento total dividido em três etapas sendo que cada etapa é uma repetição do experimento com diferentes minitubérculos.

Na tabela 3, são apresentados os dias que foram realizadas as imagens para cada etapa do experimento. Houve uma média de 10 imagens por amostra em cada etapa do experimento, em aproximadamente 18 dias para cada etapa.

Tabela 3 - Dias de imagens realizadas em cada etapa do experimento. Onde está 'ok' é o dia que a imagem foi realizada, sendo que o dia 1 é o dia de plantação da batata.

Dia	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
1 (plantação)	ok	ok	Ok
2	--	--	--
3	--	--	--
4	ok	--	--
5	--	ok	Ok
6	--	--	--
7	ok	ok	--
8	--	--	Ok
9	ok	ok	--
10	ok	--	Ok
11	ok	ok	Ok
12	ok	--	Ok
13	--	ok	Ok
14	ok	--	Ok
15	--	ok	ok
16	--	ok	--
17	ok	--	Ok
18	ok	--	Ok
19	--	--	--
20	--	--	--
número total de imagens	10	8	11

Na figura 27 observa-se a evolução das raízes com o passar do tempo, portanto é possível visualizar as raízes, que possuem espessura de aproximadamente 0,5mm, através de imagem de ressonância magnética. Através dessas imagens, vemos o padrão com que as raízes crescem e também podemos ter a noção da velocidade do crescimento.

Figura 27 - Imagens realizadas na segunda etapa do experimento em uma amostra com 4% de água. A sequência acima mostra a evolução das raízes com o passar dos dias. A) Imagem realizada no dia do plantio; B) após 4 dias; C) após 6 dias; D) após 8 dias; E) após 14 dias; F) após 15 dias.

4.6 TRATAMENTO DAS IMAGENS

Todas as amostras de batata-sementes utilizadas nas três etapas do experimento são da mesma colheita, portanto foram armazenadas em refrigeração adequada no laboratório no mesmo dia. Sendo utilizadas conforme o andamento dos experimentos.

Portanto, a primeira etapa do experimento foi realizada com as batatas ainda no período de dormência, e nas outras duas etapas do experimento a batata já havia passado o período de dormência no armazenamento refrigerado. Por causa disso, as raízes na primeira etapa do experimento demoraram mais para crescer e possuíam menos quantidade de raízes.

Devido a essa diferença, utilizamos o *software image J (open source)* para tratarmos as imagens, de forma que a batata e o caule não aparecessem nas imagens da primeira etapa do experimento. Esse tratamento parecia ser melhor para a análise posterior em multifractal, já que teríamos apenas a concentração de raiz na análise.

Nas outras duas etapas, só retiramos as interferências que apareceram em algumas imagens, pois as raízes acabaram se confundindo com o minitubérculo no momento da visualização da imagem 3D, como pode ser observado na figura 28.

Figura 28 - Imagens com e sem tratamento pelo programa ImageJ para as três etapas do experimento. Na primeira etapa o tratamento realizado foi diferente, as batatas e caules que apareceram na imagem foram retirados, nas duas últimas etapas não foram retiradas as batatas e os caules, mas somente as interferências que apareciam em algumas imagens. Imagem da primeira etapa: A) sem tratamento; B) com tratamento; Imagem da segunda etapa: C) sem tratamento; D) com tratamento; Imagem da terceira etapa: E) com tratamento; F) sem tratamento.

As interferências nas imagens, citadas acima, possuíam causas externas e internas. As causas internas foram o excesso de água, que apareceram em algumas imagens, principalmente nas amostras que possuíam 8% de água.

Algumas imagens tiveram que ser excluídas pois havia muita água na frente das raízes, dificultando a sua visualização. A possível causa desse acontecimento é a irrigação com pouco tempo antes da imagem e a alta umidade do ar nesses dias, o que diminui a evapotranspiração e, portanto, aumenta a quantidade de água na amostra. Na figura 29 temos um exemplo.

Figura 29 - Imagem realizada na segunda etapa do experimento com a amostra do recipiente O, que possui 8% de água. Nessa imagem fica claro como o excesso de água visto na imagem impossibilitou a utilização da mesma nas análises.

A interferência externa aconteceu em algumas imagens. Não foi encontrada a fonte dessa interferência durante o experimento, portanto fizemos os tratamentos nas imagens com o Programa Image J para que não houvesse erro no momento das análises dos dados.

Figura 30 - Imagem realizada na terceira etapa do experimento com uma amostra de 5% de água na qual foi observada a existência de uma interferência. A) Imagem obtida inicialmente; B) imagem após tratamento pelo Image J.

Algumas limitações do próprio sistema de imagem refletiram nas imagens realizadas, como é apresentado a seguir.

Com o passar do tempo as raízes foram aumentando de comprimento, quando elas ficavam muito grandes, ocupam um espaço maior do que o tamanho do FOV definido para as imagens resultando em *aliasing* (89), como na figura 31, isso ocorreu em apenas algumas imagens e não com todas as amostras.

Esse problema não pôde ser evitado pois se aumentássemos o tamanho do FOV da imagem a resolução diminuiria, e como esse é um parâmetro muito importante para as imagens, devido ao pequeno tamanho das raízes, acabamos dando prioridade à resolução da imagem. Outras técnicas de eliminação de *aliasing*, como pulso saturado que é sugerido por (90), não foram utilizadas pois perderíamos as informações das raízes que cresceram fora do FOV, e essas raízes, mesmo estando fora do FOV, fazem parte da análise desse trabalho.

Figura 31 - Imagem realizada na segunda etapa do experimento com uma amostra de 8% de água na qual houve o aparecimento de *aliasing* das raízes que ultrapassaram o limite inferior do FOV das imagens.

Um grande limitante desse trabalho foi o *threshold* do sistema. O *threshold* define o valor mínimo de sinal que é imagem, sinais com intensidade abaixo desse valor, são considerados ruídos e são eliminados da imagem. Portanto, as raízes que possuíam sinal abaixo desse limite mínimo, foram consideradas como ruídos e perdemos a visualização dessas raízes. As imagens que perderam as raízes por esse motivo foram excluídas das análises, figura 32.

Figura 32 - Imagem realizada na segunda etapa do experimento com uma amostra de 4% de água na qual mesmo fazendo o *threshold* não houve total recuperação da imagem das raízes.

4.7 ANÁLISE MULTIFRACTAL

Após o tratamento nas imagens, foram feitas as análises multifractais. Para esse procedimento, foi utilizado o *software* MASS, desenvolvido pelos pesquisadores do CIP (87,88), que utiliza a técnica de *box-counting* para o cálculo dos parâmetros multifractais.

Figura 33 - Software desenvolvido pelo CIP e que foi utilizado para análise multifractal (MASS).

Porém, para que as imagens pudessem ser utilizadas no MASS, elas tiveram que ser tratadas anteriormente no programa Image J. Nesse programa, as imagens foram convertidas em 8 bits, tamanho 1000x1000 (o que facilitou a escolha dos tamanhos dos boxes) e as imagens foram transformadas em binárias, na qual os pixels pretos foram considerados como raiz, e os pixels brancos representando o substrato. Também convertimos as imagens obtidas de .tif para .txt pelo programa ImageJ assim foi possível importá-las no programa MASS.

Após esse tratamento nas imagens elas puderam ser utilizadas pelo MASS. Nesse programa, foram feitos os ajustes do número de *q*'s (geralmente entre -1 e 2) e de *boxes* (os valores utilizados são proporcionais ao tamanho da imagem,

geralmente são: 20, 50, 100, 200 e 500) (88) e então foi feita a análise pelo *software* MASS (64).

Através das análises das imagens são obtidos os dados dos parâmetros multifractais, os quais são apresentados na tabela 4. Os valores dos q 's e L 's (*boxes*) são os escolhidos durante a análise, e para cada valor de q existem respectivos valores dos outros parâmetros multifractais que aparecem na tabela 4. Os dados obtidos por essa análise são, a singularidade (α) e seus respectivos erro e coeficiente de determinação, o espectro de singularidade $f(\alpha)$ e seus respectivos erro e coeficiente de determinação, o expoente Renyi $\tau(q)$, a dimensão generalizada D_q e seu erro, e as capacidades de dimensão D_0 , D_1 e D_2 , lembrando que $D_0 \geq D_1 \geq D_2$. Na tabela 4 são apresentados os dados extraídos do MASS para uma imagem realizada na etapa 1 do experimento no dia 12/11/10 na amostra do recipiente C.

Tabela 4 - Dados gerados pelo programas MASS para a imagem realizada na etapa 1 do experimento no dia 12/11/10 na amostra do recipiente C. A primeira coluna possui os valores escolhidos para Q e as colunas que seguem são os parâmetros multifractais e seus erros.

Q	L	alpha	f(alpha)	R2 alpha	R2 f(alpha)	B1 error alpha	B1 error f(alpha)	TAU	Dq	ErrorDq	D012
-2	20	2,32466	0,85955	0,84858	0,873861	0,519501	1,263686	-5,5089	1,8363	0,73631	1,36195
-1,9	50	2,31872	0,87112	0,85044	0,872965	0,522687	1,265573	-5,2767	1,8195	0,73982	1,35155
-1,8	100	2,31259	0,88245	0,85296	0,872128	0,524236	1,266989	-5,0451	1,8018	0,74162	1,33616
-1,7	200	2,30623	0,89359	0,8565	0,871408	0,52333	1,267574	-4,8142	1,783	0,74081	0
-1,6	500	2,29952	0,90465	0,86155	0,870895	0,518883	1,266787	-4,5839	1,763	0,73621	0
-1,5	0	2,29229	0,91586	0,86867	0,870712	0,509518	1,26383	-4,3543	1,7417	0,72625	0
-1,4	0	2,28417	0,92762	0,8785	0,871029	0,493586	1,257577	-4,1255	1,7189	0,70893	0
-1,3	0	2,27455	0,94059	0,89158	0,872062	0,469302	1,24652	-3,8975	1,6946	0,68188	0
-1,2	0	2,26243	0,95571	0,90808	0,874055	0,435059	1,228779	-3,6706	1,6685	0,6426	0
-1,1	0	2,24623	0,9743	0,9274	0,877241	0,390031	1,202259	-3,4452	1,6406	0,58899	0
-1	0	2,22357	0,99803	0,94783	0,881766	0,335029	1,164992	-3,2216	1,6108	0,5204	0
-0,9	0	2,19117	1,02871	0,96665	0,88761	0,273372	1,115591	-3,0008	1,5793	0,43914	0
-0,8	0	2,14491	1,0679	0,98129	0,89458	0,210976	1,053504	-2,7838	1,5466	0,35155	0
-0,7	0	2,08053	1,11602	0,9907	0,902447	0,154676	0,978722	-2,5724	1,5132	0,26713	0
-0,6	0	1,99539	1,17118	0,99577	0,911183	0,109155	0,89135	-2,3684	1,4803	0,19449	0
-0,5	0	1,89093	1,2285	0,9981	0,920989	0,076622	0,792444	-2,174	1,4493	0,13973	0
-0,4	0	1,77468	1,28076	0,99887	0,931902	0,061716	0,686401	-1,9906	1,4219	0,11325	0
-0,3	0	1,6592	1,32124	0,99878	0,94333	0,066094	0,581862	-1,819	1,3992	0,1187	0
-0,2	0	1,55748	1,34683	0,99838	0,954206	0,077623	0,48818	-1,6583	1,3819	0,13395	0
-0,1	0	1,47788	1,35897	0,99804	0,963754	0,086142	0,410074	-1,5068	1,3698	0,14238	0
0	0	1,42214	1,36195	0,99792	0,971913	0,088973	0,345906	-1,362	1,362	0,14154	0
0,1	0	1,38707	1,36035	0,99804	0,979021	0,086337	0,29052	-1,2216	1,3574	0,13311	0
0,2	0	1,36739	1,3575	0,99836	0,985309	0,078633	0,238898	-1,084	1,355	0,11832	0
0,3	0	1,35785	1,35518	0,99885	0,990729	0,065842	0,187941	-0,9478	1,354	0,09752	0
0,4	0	1,35425	1,35396	0,99939	0,995061	0,047832	0,136511	-0,8123	1,3538	0,07084	0
0,5	0	1,35361	1,35369	0,99983	0,998084	0,024922	0,084855	-0,6769	1,3538	0,03853	0
0,6	0	1,35404	1,35392	0,99998	0,999688	0,008332	0,034203	-0,5415	1,3537	0,0134	0
0,7	0	1,35444	1,35418	0,99963	0,999914	0,037213	0,018018	-0,4061	1,3536	0,02428	0
0,8	0	1,35425	1,35403	0,99862	0,998927	0,071955	0,063495	-0,2706	1,3532	0,06746	0
0,9	0	1,35328	1,3532	0,99686	0,996976	0,108638	0,106639	-0,1352	1,3525	0,10763	0
1	0	1,35155	1,35155	0,99433	0,994331	0,146017	0,146017	8,9E-16	1,3515	0,14602	0
1,1	0	1,34918	1,34905	0,99108	0,991247	0,183137	0,181399	0,13505	1,3505	0,18226	0
1,2	0	1,34631	1,34575	0,9872	0,987938	0,219276	0,212844	0,26982	1,3491	0,21601	0
1,3	0	1,34311	1,34176	0,9828	0,984569	0,253936	0,240579	0,40428	1,3476	0,24708	0
1,4	0	1,33973	1,33718	0,97802	0,981257	0,28681	0,264926	0,53844	1,3461	0,27543	0
1,5	0	1,33626	1,33215	0,97296	0,978076	0,317743	0,286248	0,67224	1,3445	0,30117	0
1,6	0	1,33279	1,32678	0,96772	0,975071	0,346697	0,304913	0,80568	1,3428	0,32447	0
1,7	0	1,32939	1,32117	0,96239	0,972263	0,373707	0,321266	0,93879	1,3411	0,34551	0
1,8	0	1,32608	1,31538	0,95702	0,969659	0,398855	0,335621	1,07156	1,3395	0,36452	0
1,9	0	1,3229	1,30949	0,95166	0,967256	0,422248	0,348254	1,20402	1,3378	0,3817	0
2	0	1,31984	1,30352	0,94637	0,965044	0,444004	0,359402	1,33616	1,3362	0,39725	0
2,1	0	1,3169	1,29751	0,94115	0,963012	0,464239	0,369268	1,46798	1,3345	0,41134	0
2,2	0	1,31409	1,29146	0,93603	0,961148	0,483063	0,378021	1,59954	1,3329	0,42413	0
2,3	0	1,31139	1,2854	0,93103	0,959437	0,500578	0,385805	1,7308	1,3314	0,43576	0
2,4	0	1,3088	1,27931	0,92615	0,957868	0,516878	0,39274	1,86181	1,3299	0,44634	0
2,5	0	1,30631	1,2732	0,9214	0,956429	0,532045	0,39893	1,99258	1,3284	0,45597	0
2,6	0	1,3039	1,26706	0,91679	0,955109	0,546156	0,404461	2,12308	1,3269	0,46475	0
2,7	0	1,30158	1,2609	0,91232	0,953898	0,559278	0,409406	2,25337	1,3255	0,47275	0
2,8	0	1,29932	1,25469	0,90799	0,952788	0,571473	0,413828	2,38341	1,3241	0,48004	0
2,9	0	1,29713	1,24844	0,90379	0,95177	0,582798	0,417784	2,51324	1,3228	0,48668	0

A partir desses dados, construiu-se o espectro de singularidade (espectro multifractal) para cada imagem e dessa forma obteve-se os padrões de informação de cada uma delas (91). No caso do exemplo apresentado na figura 35, que é referente aos dados da tabela 4, a imagem possui padrão multifractal, como podemos ver na figura, já que forma uma curva com um ponto máximo. A grande concentração de pontos do lado esquerdo do gráfico representa a concentração de matéria na imagem, ou seja, a análise está identificando as raízes presentes na imagem.

A figura 34 é da imagem realizada na etapa 1 do experimento no dia 12/11/10 na amostra do recipiente C.

Figura 34 - Curva com os dados de α e $f(\alpha)$ para a imagem analisada na etapa 1 do experimento no dia 12/11/10 na amostra do recipiente C. O padrão apresentado pela curva, que possui um ponto máximo, mostra que as informações apresentadas nas imagens possuem padrão multifractal.

Com os parâmetros multifractais α , q e $f(\alpha)$ obtidos pelo programa MASS para cada imagem, foram realizadas as análises de verificação de sensibilidade da amostra com a variação hídrica.

Para cada imagem, encontrou-se os valores de α e $f(\alpha)$ quando $q=0$, 1 e -1 e os valores de $\alpha_{\text{máx}}$ e α_{min} de cada imagem. A partir desses valores, calculou-se o parâmetro $\Delta\alpha$ ($\alpha_{\text{máx}} - \alpha_{\text{min}}$), Δf_1 ($f(q=0) - f(q=1)$) e Δf_{-1} ($f(q=0) - f(q=-1)$), como pode ser visto na tabela 5 que foi utilizada para a análise de sensibilidade. Também foi inserida a área da raiz calculada através do programa ImageJ e os *thresholds*

utilizados para o cálculo da área, assim como a porcentagem de água em cada amostra.

Tabela 5 - Dados utilizados para a análise, nela estão contidos os dados extraídos através do programa MASS, cálculos feitos com esses resultados, a área da raiz obtida pelo programa ImageJ e o threshold utilizado no cálculo dessa área para cada imagem realizada em todo o experimento. No caso dessa figura, é apresentada somente algumas informações das imagens realizadas na etapa 1 do experimento.

imagem	$\alpha(q=0)$	$\Delta\alpha$	$\alpha(q=1)$	$f(q=1)$	$\alpha(q=-1)$	$f(q=-1)$	Δf_1	Δf_{-1}	% água	Área da raiz (pixel)	Dia da medida	α_{min}	α_{max}	$f(q=0)$
P1-A-06/11	0,97792	0,06286	1,02335	1,02335	1,78214	0,48373	0,00432	0,54394	4	6372	06/11/2010	0,98367	1,04653	1,02767
P1-A-09/11	1,18917	0,393	1,17164	1,17164	2,01066	0,65072	0,01045	0,53137	4	11065	09/11/2010	1,11209	1,50509	1,18209
P1-A-11/11	1,32671	0,50779	1,20543	1,20543	3,39749	0,10238	0,03913	1,14218	4	16281	11/11/2010	1,15484	1,66263	1,24456
P1-A-12/11	1,21784	0,32449	1,2269	1,2269	1,91283	0,77678	0,00539	0,45551	4	17339	12/11/2010	1,15377	1,47826	1,23229
P1-A-13/11	1,21477	0,07433	1,21315	1,21315	1,91735	0,68141	0,01114	0,54288	4	15937	13/11/2010	1,1542	1,22853	1,22429
P1-A-14/11	1,28455	0,3181	1,2303	1,2303	2,18885	0,72605	0,01859	0,52285	4	18662	14/11/2010	1,19098	1,50908	1,24889
P1-C-06/11	1,13765	0,84203	1,03386	1,03386	2,27625	0,47867	0,01061	0,5658	4	7486	06/11/2010	1,02787	1,8699	1,04447
P1-C-09/11	1,21562	0,21967	1,23033	1,23033	1,83087	0,81656	0,05936	0,47313	4	27707	09/11/2010	1,10817	1,32784	1,28969
P1-C-11/11	1,32671	0,50779	1,20543	1,20543	3,39749	0,10238	0,03913	1,14218	4	37792	11/11/2010	1,15484	1,66263	1,24456
P1-C-12/11	1,42214	0,7834	1,35155	1,35155	2,22357	0,99803	0,0104	0,36393	4	39815	12/11/2010	1,29713	2,08053	1,36195

As análises foram feitas para todos os parâmetros (α e $f(\alpha)$ quando $q=0$, 1 e -1, também para $\alpha_{máx}$, α_{min} , $\Delta\alpha$, Δf_1 e Δf_{-1}) em relação à área da raiz, como é exemplificado na figura 36 para $\alpha(q=1)$. Foi escolhida a área por que ela representa a capacidade da fixação do vegetal (cultura) e absorção da água e sais minerais do solo.

Em cada gráfico obtido nas análises foram calculados os valores das equações da reta e o valor de R^2 , coeficiente de determinação, que é a porcentagem da variação da variável dependente, portanto, quanto mais próximo de 1 for o R^2 melhor são as correlações entre os dados medidos (área) e os parâmetros multifractais.

Para a análise de $\alpha_{máx}$, α_{min} foram considerados, respectivamente, os valores máximos e mínimos de α na tabela gerada pelo MASS no qual a coluna de R^2 de α e de R^2 de $f(\alpha)$ apresentavam, simultaneamente, valores maiores do que 0,9.

Foram escolhidos os parâmetros multifractais cujos gráficos resultantes da análise possuem $R^2 \geq 0,85$. Portanto, as análises cujos gráficos possuíam $R < 0,85$ foram excluídas e só foram consideradas aquelas com $R^2 \geq 0,85$. Temos dois exemplos de análises, uma considerada como um parâmetro ruim e outra como um parâmetro bom devido ao valor do R^2 . Na figura 35, temos alguns gráficos obtidos para a análise do $\alpha(q=1)$ x área da raiz, cada coluna é composta de amostras com a mesma quantidade percentual de água e cada gráfico é uma amostra de uma etapa

do experimento, os pontos do gráfico são os valores obtidos para a amostra em cada dia da análise. No título de cada um dos gráficos que compõem a figura 35, temos o nome que caracteriza a imagem, como por exemplo P1-A, P1-C, etc. A sigla P1 significa que a amostra foi realizada na etapa 1 do experimento, ou seja, na primeira vez que foram realizadas as imagens, e P2 na etapa 2 do experimento, ou seja, na segunda vez que foram realizadas as imagens. A letra que segue essa sigla é a letra correspondente ao recipiente que a amostra foi plantada.

Pela análise dos gráficos, vemos que a maioria dos gráficos possuem $R^2 > 0,85$, somente os gráficos das amostras P1-E e P1-C não se enquadram nesse padrão, portanto foram excluídos da análise.

Pela análise dos gráficos, vemos que a maioria dos gráficos possuem $R^2 > 0,85$, somente os gráficos das amostras P1-E e P1-C não se enquadram nesse padrão, portanto foram excluídos da análise.

Figura 35 - Gráficos de algumas amostras com a relação de $\alpha(q=1)$ e da área das raízes, cada ponto do gráfico é relativo a um dia de medida da amostra. Na primeira coluna de gráfico são amostras com 4% de água, na segunda coluna são amostras com 5% de água, na terceira 6% e na quarta 8%. As análises com forte correlação ($R^2 > 0,85$) foram mantidas nas análises, como pode-se observar pelo exemplo da figura, é a maioria dos casos.

Para as análises consideradas sensíveis à variação hídrica, foram selecionadas as amostras com $R^2 \geq 0,85$ e selecionados os valores da intersecção e da inclinação da reta do gráfico de cada amostra, como está representado na tabela 6.

Tabela 6 - Valores das inclinações e intersecções das retas de cada gráfico de $\alpha(q=1)$ x área das raízes. Todos os dados possuem forte correlação ($R^2 > 0,85$).

imagem	inclinação	intersecção	R2	%água
P1-A	2,00E-05	0,9495	0,8959	4
P2-A	5,00E-06	1,0773	0,9643	4
P2-B	5,00E-06	1,0166	0,9761	4
P2-C	4,00E-06	1,1079	0,9863	4
P2-D	7,00E-06	0,949	0,9235	4
P3-A	8,00E-06	0,8655	0,9579	4
P3-B	5,00E-06	1,0426	0,9863	4
P3-C	7,00E-06	0,9596	0,9743	4
P3-D	6,00E-06	1,0332	0,9413	4
P1-F	1,00E-05	0,9926	0,9832	5
P1-G	9,00E-06	1,063	0,9288	5
P1-H	7,00E-06	1,0923	1	5
P2-E	5,00E-06	0,9975	0,954	5
P2-F	5,00E-06	1,0617	0,9726	5
P2-G	5,00E-06	1,016	0,9514	5
P2-H	5,00E-06	1,0132	0,9844	5
P3-E	6,00E-06	1,0267	0,9637	5
P3-F	5,00E-06	1,0445	0,9795	5
P3-G	6,00E-06	0,9891	0,9036	5
P3-H	6,00E-06	0,9772	0,9792	5
P1-I	1,00E-05	0,9744	0,9456	6
P1-L	9,00E-06	1,0459	0,9994	6
P2-I	5,00E-06	0,9785	0,924	6
P2-J	6,00E-06	1,0171	0,875	6
P2-L	5,00E-06	1,0044	0,9652	6
P3-J	5,00E-06	1,0665	0,9169	6
P3-L	7,00E-06	0,9193	0,9545	6
P1-M	1,00E-05	1,0167	0,9737	8
P1-O	1,00E-05	1,0075	0,9511	8
P2-M	5,00E-06	0,9977	0,9857	8
P2-N	1,00E-05	0,8198	0,9374	8
P3-M	5,00E-06	1,041	0,9775	8
P3-N	6,00E-06	0,986	0,9688	8
P3-O	8,00E-06	0,9168	0,9481	8

A partir desses valores, obteve-se a média da intersecção e da inclinação da reta para cada porcentagem de água além do valor médio do coeficiente de relação, R^2 , como pode ser visto na tabela 7

Tabela 7 - Valores médios das inclinações e intersecções das retas dos gráficos de $\alpha(q=1)$ x área das raízes para cada porcentagem de água. Todos os dados possuem forte correlação ($R^2 > 0,85$).

imagem	inclinação	intersecção	R^2	%água
MÉDIA 4%	6,00E-06	1,0166	0,9643	4
MÉDIA 5%	6,00E-06	1,0160	0,9726	5
MÉDIA 6%	6,00E-06	1,0044	0,9456	6
MÉDIA 8%	8,00E-06	0,9977	0,9688	8

Com esses valores, fizemos as análises da inclinação e intersecção da reta para cada parâmetro multifractal e verificamos quais poderiam ser considerados sensíveis ao estresse hídrico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O experimento foi dividido em três etapas, ou seja, foi realizado em três épocas diferentes com amostras distintas. Sendo que etapa continha 4 amostras com o substrato irrigado de 4 % de água, mais 4 amostras com 5% de água, 3 amostras com 6% de água e outras 3 amostras com 8% de água, totalizando 14 amostras em cada etapa.

Na primeira etapa, as imagens foram realizadas nos dias 3, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 19 e 20/11/10, na figura 36, são apresentadas todas as imagens obtidas na amostra contida no recipiente A da etapa 1 do experimento, que possui 4% de água.

Pelas imagens podemos acompanhar o desenvolvimento das raízes com o passar dos dias e também observamos a interferência das limitações do experimento, na qualidade das imagens. Nas imagens de A a I existem sinais de interferências externas, nas imagens de A a E e na G existem excesso de água que acabaram prejudicando a imagem e nas imagens de H a J o *threshold* limitado não permitiu que os sinais mais baixos da amostra aparecessem nas imagens.

Na segunda etapa do experimento, as imagens foram realizadas nos dias 5, 9, 11, 13, 15, 17, 19 e 20/12/10, na figura 37, são apresentadas todas as imagens obtidas na amostra contida no recipiente E da etapa 2 do experimento, que possui 5% de água.

As imagens mostram o crescimento de um grande número de raízes devido ao período de dormência da batata ter ocorrido durante o tempo que estava na geladeira. Também analisamos as imagens com o intuito de localizar as interferências das limitações do experimento e assim tratá-las. Nas imagens A e B existem etapas com excesso de água, nas imagens C e D percebemos que o *threshold* limitado não permitiu que os sinais mais baixos da amostra aparecessem em algumas etapas das imagens, nas imagens de E a H e na C existem sinais de interferências externas e nas imagens de D a H foram observados *aliasing* e que a circunferência do recipiente prejudicou o desenvolvimento natural das amostras.

Na terceira etapa do experimento, as imagens foram realizadas nos dias 6, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22 e 23/01/11, na figura 38, são apresentadas todas

as imagens obtidas na amostra contida no recipiente O da etapa 3 do experimento, que possui 8% de água.

As imagens mostram o desenvolvimento das raízes com o passar do tempo, porém a quantidade de raízes ausentes devido à interferência do *threshold* não nos permite ter certeza se haviam mais raízes do que é observado nas imagens, com exceção da imagem A, todas as outras imagens apresentam limitações de *threshold*. Em todas as imagens também são observadas as interferências externas nas imagens, nas imagens de C a J aparecem *aliasing* e nas imagens a partir da C observamos o limite da circunferência do recipiente na imagem.

Após a análise das limitações existentes nas imagens, essas foram tratadas para que as análises multifractais posteriores fossem corretas. Nas imagens do recipiente A da etapa 1 do experimento, figura 39, foi excluída a primeira imagem (que é a da batata semente no dia da plantação, ou seja, sem raízes) já que nessa etapa do experimento foram excluídas as primeiras imagens de todas as amostras (ver Subcapítulo 4.6 Limitações do experimento), foram retiradas as interferências externas e os excessos de água presentes nas imagens e foram excluídas as imagens dos dias 16, 19 e 20/11/10 pelo grande prejuízo causado pelo *threshold* limitado na confiabilidade da informação contida nas imagens.

Mesmo com as interferências das limitações do experimento nas imagens do recipiente E da etapa 2 do experimento, todas as imagens puderam ser aproveitadas para as análises posteriores após o tratamento, que é apresentado na figura 40. As interferências externas e os excessos de água foram retirados, o *threshold* nas imagens dos dias 11 e 13/12/10 não foram considerados como prejudiciais para as imagens, já que apenas uma pequena parte das imagens foi afetada e podemos acompanhar o aumento do número de pixels devido às raízes entre uma imagem e outra.

Na terceira etapa do experimento, no recipiente O, foram desconsideradas várias imagens devido ao grande número de raízes excluídas pela limitação do *threshold*. As imagens mantidas para a análise foram as do dia 6 até o dia 16/01/11, após esse dia não confiamos na credibilidade da qualidade das imagens, pois a quantidade de raízes observadas parece diminuir ao invés de aumentar, o que traria grande distorção às análises futuras. Nas imagens consideradas, também retiramos os efeitos visuais das interferências externas.

Figura 36 - Todas as imagens realizadas na amostra do recipiente A da Etapa 1 do experimento. A ordenação temporal das imagens é a mesma que a alfabética, portanto, as imagens de A a J foram realizadas, respectivamente, em 3, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 19 e 20/11/10 .

Figura 37 - Todas as imagens realizadas na amostra do recipiente E da Etapa 2 do experimento. A ordenação temporal das imagens é a mesma que a alfabética, portanto, as imagens de A a H foram realizadas, respectivamente, em 5, 9, 11, 13, 15, 17, 19 e 20/12/10.

Figura 38 - Todas as imagens realizadas na amostra do recipiente O da Etapa 3 do experimento. A ordenação temporal das imagens é a mesma que a alfabética, portanto, as imagens de A a L foram realizadas, respectivamente, em 6, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22 e 23/01/11.

Figura 39 - Todas as imagens da amostra do recipiente A da Etapa 1 do experimento que, após o tratamento, foram analisadas. Essas imagens foram, respectivamente com a ordem alfabética, obtidas nos dias 6, 9, 11, 12, 13 e 14/11/10.

Figura 40 - Todas as imagens da amostra do recipiente E da Etapa 2 do experimento que após o tratamento, foram analisadas. Essas imagens foram, respectivamente com a ordem alfabética, obtidas nos dias 5, 9, 11, 13, 15, 17, 19 e 20/12/10

Figura 41 - Todas as imagens da amostra do recipiente O da Etapa 3 do experimento que, após o tratamento, foram analisadas. Essas imagens foram, respectivamente com a ordem alfabética, obtidas nos dias 6, 10, 13, 15 e 16/01/11

As imagens com e sem estresse hídrico não apresentam um padrão de desenvolvimento das raízes diferente quando olhamos, veja figura 42. Porém, a análise multifractal obteve sucesso na distinção entre os casos de estresse hídrico e irrigação normal. Uma possível causa dessa não observação a olho nu é a resolução da imagem, que para a análise foi suficiente, mas para o olho humano não é perceptível.

Figura 41 - Imagens com e sem estresse hídrico. A) Copo E (5% de água) da etapa 2; B) Copo M (8% de água) da etapa 2; C) Copo E (5% de água) da etapa 3; D) Copo M (8% de água) da etapa 3. Através das imagens vemos que não há um padrão de crescimento diferente para os casos com e sem estresse hídrico.

Através das análises das informações de cada imagem reconstruída em 3D pela técnica *box-counting* no software MASS, foram extraídos os dados de parâmetros multifractais. Como já foi apresentado no capítulo 4, os valores fornecidos pelo programa são os de q e L (*boxes*) que são os escolhidos durante a análise, a singularidade (α) e seus respectivos erro e coeficiente de determinação, o espectro de singularidade $f(\alpha)$ e seus respectivos erro e coeficiente de determinação,

o expoente Renyi $\tau(q)$, a dimensão generalizada D_q e seu erro, e as capacidades de dimensão D_0 , D_1 e D_2 .

Na tabela 8 é apresentado um exemplo do resultado, são apresentados os dados extraídos para a imagem da etapa 2 do experimento no dia 20/12/10 na amostra do recipiente A.

Podemos observar nos três casos, e nos outros casos do experimento também, que $D_0 > D_1 > D_2$, o que caracteriza um sistema multifractal, já que no sistema fractal auto-similar ou homogêneo $D_0 = D_1 = D_2$ (25).

Tabela 8 - Dados gerados pelo programas MASS para a imagem realizada na etapa 2 do experimento no dia 20/12/10 na amostra do recipiente A. A primeira coluna possui os valores escolhidos para Q e as colunas que seguem são os parâmetros multifractais e seus erros.

Q	L	α	$f(\alpha)$	R^2 α	R^2 $f(\alpha)$	B1 error α	B1 error $f(\alpha)$	TAU	Dq	ErrorDq	D012
-1	10	3,45926	0,6542	0,59795	0,92302	0,8716	1,62319	-4,1135	2,05673	1,13418	1,45199
-0,9	20	3,37775	0,73146	0,68913	0,92631	0,79822	1,54798	-3,7714	1,98496	1,0533	1,38559
-0,8	50	3,2712	0,82179	0,78552	0,93226	0,6977	1,43273	-3,4388	1,91042	0,93842	1,37139
-0,7	100	3,13168	0,92612	0,87454	0,94159	0,56994	1,26731	-3,1183	1,83429	0,78627	0
-0,6	200	2,95288	1,042	0,94075	0,95404	0,42489	1,05304	-2,8137	1,75858	0,60547	0
-0,5	500	2,73515	1,16145	0,97789	0,96756	0,28379	0,81368	-2,529	1,68602	0,42081	0
-0,4	0	2,49038	1,27146	0,99318	0,97873	0,17116	0,59656	-2,2676	1,61972	0,26601	0
-0,3	0	2,24144	1,35866	0,99788	0,98483	0,10173	0,45203	-2,0311	1,56238	0,16608	0
-0,2	0	2,01387	1,41583	0,999	0,98591	0,07261	0,39124	-1,8186	1,5155	0,12249	0
-0,1	0	1,82552	1,44445	0,99921	0,98448	0,06614	0,37241	-1,627	1,47909	0,11233	0
0	0	1,68214	1,45199	0,99922	0,98355	0,06606	0,35347	-1,452	1,45199	0,11132	0
0,1	0	1,57988	1,44719	0,99925	0,98483	0,06438	0,31862	-1,2892	1,43245	0,10712	0
0,2	0	1,51044	1,43701	0,9994	0,98828	0,05721	0,26721	-1,1349	1,41865	0,09424	0
0,3	0	1,46496	1,4258	0,99965	0,99274	0,0434	0,20362	-0,9863	1,40902	0,07155	0
0,4	0	1,43593	1,41575	0,99985	0,99675	0,02792	0,13332	-0,8414	1,4023	0,04617	0
0,5	0	1,41765	1,4076	0,99976	0,99927	0,03549	0,06244	-0,6988	1,39755	0,04526	0
0,6	0	1,4061	1,40128	0,99909	0,99986	0,06878	0,02717	-0,5576	1,39405	0,03895	0
0,7	0	1,39854	1,39639	0,99762	0,9986	0,11092	0,08505	-0,4174	1,39137	0,09627	0
0,8	0	1,39323	1,39243	0,99523	0,99587	0,15669	0,14584	-0,2778	1,38923	0,15107	0
0,9	0	1,38912	1,38894	0,99192	0,99212	0,20368	0,20117	-0,1387	1,38732	0,20242	0
1	0	1,38559	1,38559	0,98778	0,98778	0,2504	0,2504	-2E-16	1,38559	0,2504	0
1,1	0	1,38236	1,3822	0,98294	0,98318	0,2959	0,29378	0,1384	1,38396	0,29483	0
1,2	0	1,37927	1,37865	0,97752	0,97854	0,33967	0,33187	0,27647	1,38237	0,33572	0
1,3	0	1,37631	1,37494	0,97166	0,974	0,38151	0,36536	0,41426	1,38088	0,37326	0
1,4	0	1,37346	1,3711	0,96545	0,96963	0,42141	0,39493	0,55174	1,37936	0,40774	0
1,5	0	1,37075	1,36717	0,95897	0,96547	0,45951	0,42119	0,68895	1,37791	0,43951	0
1,6	0	1,3682	1,36322	0,95225	0,96153	0,49598	0,44467	0,8259	1,3765	0,46892	0
1,7	0	1,36582	1,3593	0,94535	0,9578	0,531	0,46583	0,96259	1,37513	0,49629	0
1,8	0	1,36362	1,35545	0,9383	0,95427	0,56476	0,48503	1,09907	1,37383	0,52187	0
1,9	0	1,36159	1,3517	0,9311	0,95093	0,59741	0,50255	1,23532	1,37258	0,54589	0
2	0	1,35973	1,34807	0,9238	0,94777	0,62907	0,51862	1,37139	1,37139	0,56853	0

O espectro de singularidade ou espectro multifractal caracteriza a distribuição espacial do sistema. Portanto, fizemos essa análise para todas as imagens, como exemplo é apresentado o espectro de singularidade relativo aos dados da tabela 8, apresentado na figura 43, que representa a curva do espectro de singularidade da imagem realizada na etapa 2 do experimento no dia 20/12/10 na amostra do recipiente A. Observamos que nesses casos, assim como nos outros casos do experimento, o resultado caracteriza um sistema multifractal, já que ele apresenta uma forma curvada de forma parabólica com um ponto máximo (92).

Figura 43 - Curva com os dados de α e $f(\alpha)$ para a imagem realizada na etapa 2 do experimento no dia 20/12/10 na amostra do recipiente A. O padrão apresentado pela curva, que possui um ponto máximo, mostra que os as informações apresentadas nas imagens possuem padrão multifractal.

Como essa análise demonstrou que o sistema tem um comportamento multifractal, estudamos os parâmetros com o intuito de verificar se algum deles poderia ser utilizado na análise de estresse hídrico. Através dos parâmetros multifractais gerados pelo MASS, foi possível selecionar esses parâmetros a serem estudados.

Na tabela 9 são apresentados os parâmetros escolhidos para o estudo de cada imagem obtida na etapa 1 do experimento. Os parâmetros foram as singularidades α para $q=0, 1$ e -1 , α_{max} , α_{min} e $\Delta\alpha$ que é $\alpha_{max}-\alpha_{min}$, e os espectros de singularidade $f(\alpha)$ para $q=0, 1$ e -1 , Δf_1 ($f(q=0)-f(q=1)$) e Δf_{-1} ($f(q=0)-f(q=-1)$). Além disso, consideramos na tabela a Área da raiz calculada através do programa Image J e a porcentagem de água de cada amostra.

Tabela 9 - Dados utilizados para a análise de todos os parâmetros multifractais. Na primeira coluna tem-se cada imagem, depois do tratamento, utilizada nas análises, nas outras colunas estão os parâmetros que foram analisados, a porcentagem de água de cada amostra e o dia da medida. São apresentadas as imagens da etapa 1 do experimento.

imagem	$\alpha(q=0)$	$\Delta\alpha$	$\alpha(q=1)$	$f(q=1)$	$\alpha(q=-1)$	$f(q=-1)$	Δf_1	Δf_{-1}	% água	Área da raiz (pixel)	Dia da medida	α_{min}	α_{max}	$f(q=0)$
P1-A-06/11	0,97792	0,06286	1,02335	1,02335	1,78214	0,48373	0,00432	0,54394	4	6372	06/11/2010	0,98367	1,04653	1,02767
P1-A-09/11	1,18917	0,393	1,17164	1,17164	2,01066	0,65072	0,01045	0,53137	4	11065	09/11/2010	1,11209	1,50509	1,18209
P1-A-11/11	1,32671	0,50779	1,20543	1,20543	3,39749	0,10238	0,03913	1,14218	4	16281	11/11/2010	1,15484	1,66263	1,24456
P1-A-12/11	1,21784	0,32449	1,2269	1,2269	1,91283	0,77678	0,00539	0,45551	4	17339	12/11/2010	1,15377	1,47826	1,23229
P1-A-13/11	1,21477	0,07433	1,21315	1,21315	1,91735	0,68141	0,01114	0,54288	4	15937	13/11/2010	1,1542	1,22853	1,22429
P1-A-14/11	1,28455	0,3181	1,2303	1,2303	2,18885	0,72605	0,01859	0,52285	4	18662	14/11/2010	1,19098	1,50908	1,24889
P1-C-06/11	1,13765	0,84203	1,03386	1,03386	2,27625	0,47867	0,01061	0,5658	4	7486	06/11/2010	1,02787	1,8699	1,04447
P1-C-09/11	1,21562	0,21967	1,23033	1,23033	1,83087	0,81656	0,05936	0,47313	4	27707	09/11/2010	1,10817	1,32784	1,28969
P1-C-11/11	1,32671	0,50779	1,20543	1,20543	3,39749	0,10238	0,03913	1,14218	4	37792	11/11/2010	1,16384	1,66263	1,24456
P1-C-12/11	1,42214	0,7834	1,35155	1,35155	2,22357	0,99803	0,0104	0,36393	4	39815	12/11/2010	1,29713	2,08053	1,36195
P1-C-13/11	1,45415	0,32922	1,31353	1,31353	2,01834	1,06965	0,02293	0,26681	4	29428	13/11/2010	1,25337	1,58259	1,33646
P1-C-14/11	1,43672	0,25365	1,27092	1,27092	1,74532	1,00741	0,05365	0,31716	4	24929	14/11/2010	1,18307	1,43672	1,32457
P1-D-06/11	1,1012	0,78902	0,85593	0,85593	2,13699	0,41554	0,10915	0,54954	4	4408	06/11/2010	0,77311	1,56213	0,96508
P1-D-09/11	1,28506	1,23045	1,10787	1,10787	3,12454	0,15192	0,04877	1,00472	4	13183	09/11/2010	1,08709	2,31754	1,15664
P1-E-06/11	1,13225	0,06846	1,11158	1,11158	1,65169	0,72338	0,01769	0,40589	5	7017	06/11/2010	1,0685	1,13696	1,12927
P1-E-09/11	0,83242	0,40668	1,06843	1,06843	1,32672	0,50408	0,12395	0,6883	5	15871	09/11/2010	0,89559	1,30227	1,19238
P1-E-11/11	1,31267	0,1841	1,17612	1,17612	1,93807	0,84459	0,03943	0,37096	5	24077	11/11/2010	1,16384	1,34794	1,21555
P1-E-12/11	1,3996	0,7137	1,2252	1,2252	2,77437	0,59221	0,05349	0,68648	5	19855	12/11/2010	1,18331	1,89701	1,27869
P1-E-13/11	1,32682	1,00963	1,22089	1,22089	2,87937	0,40385	0,02257	0,83961	5	26629	13/11/2010	1,20976	2,21939	1,24346
P1-E-16/11	0,92607	0,06381	1,28787	1,28787	0,91702	0,81533	0,00218	0,47473	5	26655	16/01/2011	1,05844	1,12225	1,29005
P1-F-06/11	1,0901	0,27599	1,04671	1,04671	1,89136	0,59881	0,00695	0,45486	5	6536	06/11/2010	1,02848	1,30447	1,05366
P1-F-09/11	1,34194	0,21011	1,19333	1,19333	2,08405	0,85156	0,03171	0,37348	5	18858	09/11/2010	1,19018	1,40029	1,22504
P1-F-11/11	1,37192	0,14373	1,25143	1,25143	2,57222	0,57617	0,04405	0,71931	5	28347	11/11/2010	1,20902	1,35275	1,29548
P1-F-12/11	1,36277	0,08563	1,31029	1,31029	1,80565	0,97006	0,01499	0,35522	5	31512	12/11/2010	1,27714	1,36277	1,32528
P1-F-14/11	1,47559	1,23056	1,2996	1,2996	3,28511	0,49162	0,02935	0,83733	5	32981	14/11/2010	1,27396	2,50452	1,32895
P1-F-16/11	1,45874	0,16255	1,33542	1,33542	1,71579	1,08307	0,0352	0,28755	5	35707	16/11/2010	1,29619	1,45874	1,37062
P1-G-06/11	1,19943	0,35317	1,1234	1,1234	2,22323	0,53463	0,02194	0,61071	5	7902	06/11/2010	1,08015	1,43332	1,14534
P1-G-09/11	1,37848	0,1449	1,3034	1,3034	1,94449	1,00921	0,01859	0,31278	5	24555	09/11/2010	1,26097	1,40587	1,32199
P1-G-11/11	1,46316	1,04517	1,34814	1,34814	2,65771	0,7688	0,02154	0,60089	5	30578	11/11/2010	1,31447	2,35964	1,36968
P1-G-12/11	1,2976	0,10093	1,31539	1,31539	2,74894	0,57012	0,00138	0,74665	5	29092	12/11/2010	1,23034	1,33127	1,31677
P1-G-13/11	1,32594	0,76151	1,30592	1,30592	2,96318	0,4124	0,0136	0,90712	5	31740	13/11/2010	1,23398	1,99549	1,31952
P1-H-06/11	1,24995	0,34023	1,15595	1,15595	2,05915	0,72549	0,02122	0,45168	5	9367	06/11/2010	1,14567	1,4859	1,17717
P1-H-09/11	1,23729	0,08419	1,30106	1,30106	1,60502	0,96491	0,00386	0,34001	5	30621	09/11/2010	1,23519	1,31938	1,30492
P1-H-11/11	1,42546	0,61065	1,35217	1,35217	2,56369	0,83608	0,00541	0,5215	5	38265	11/11/2010	1,31785	1,9285	1,35758
P1-H-12/11	1,42835	0,22948	1,3381	1,3381	1,95373	1,08558	0,01198	0,2645	5	36070	12/11/2010	1,30533	1,53481	1,35008
P1-I-09/11	1,34169	0,59819	1,12538	1,12538	2,43803	0,71073	0,0477	0,46235	6	14216	09/11/2010	1,11971	1,7179	1,17308
P1-I-11/11	1,45608	1,33606	1,24193	1,24193	3,05661	0,53168	0,04544	0,75569	6	24394	11/11/2010	1,2133	2,54936	1,28737
P1-I-12/11	1,33258	0,20942	1,19709	1,19709	2,19706	0,75428	0,04364	0,48645	6	18737	12/11/2010	1,15755	1,36697	1,24073
P1-I-13/11	1,41703	1,19901	1,19397	1,19397	2,7806	0,61164	0,05349	0,63582	6	20741	13/11/2010	1,15786	2,35687	1,24746
P1-J-09/11	1,22303	0,03466	1,20674	1,20674	2,99881	0,28025	0,00263	0,92912	6	20938	09/11/2010	1,17791	1,21257	1,20937
P1-J-11/11	1,35418	0,09703	1,29965	1,29965	1,87445	0,99005	0,00228	0,31188	6	21924	11/11/2010	1,28465	1,38168	1,30193
P1-J-13/11	1,40545	0,95311	1,25169	1,25169	2,41135	0,85108	0,03353	0,43414	6	18308	13/11/2010	1,20552	2,15863	1,28522
P1-L-06/11	1,2586	0,81063	1,1232	1,1232	2,18438	0,67337	0,02889	0,47872	6	8281	06/11/2010	1,11292	1,92355	1,15209
P1-L-09/11	1,47249	1,1763	1,24253	1,24253	2,61453	0,78451	0,05046	0,50848	6	21660	09/11/2010	1,22664	2,40294	1,29299
P1-L-11/11	1,49883	0,66702	1,29512	1,29512	2,41186	0,93266	0,03503	0,39749	6	26858	11/11/2010	1,28322	1,95024	1,33015
P1-L-13/11	1,46503	0,50729	1,31956	1,31956	2,1633	1,04099	0,02873	0,3073	6	29611	13/11/2010	1,29218	1,79947	1,34829
P1-M-06/11	1,13084	0,12936	1,09026	1,09026	2,22517	0,40105	0,01707	0,70628	8	5581	06/11/2010	1,02951	1,15887	1,10733
P1-M-09/11	1,19628	0,07568	1,19008	1,19008	2,00696	0,71035	0,01072	0,49045	8	14450	09/11/2010	1,13029	1,20597	1,2008
P1-M-11/11	1,45345	0,98999	1,28079	1,28079	2,65803	0,73648	0,02788	0,57219	8	20002	11/11/2010	1,27028	2,26027	1,30867
P1-M-16/11	1,09127	0,18624	1,22573	1,22573	1,0151	1,05036	0,01092	0,18629	8	17986	16/11/2010	1,07752	1,26376	1,23665
P1-N-06/11	1,12079	0,78018	1,05622	1,05622	2,0055	0,54214	0,01954	0,53362	8	4254	06/11/2010	0,99878	1,77896	1,07576
P1-N-09/11	1,48451	1,51415	1,16681	1,16681	3,17941	0,46414	0,08889	0,79156	8	20845	09/11/2010	1,13592	2,65007	1,2557
P1-N-11/11	1,49086	0,79309	1,27067	1,27067	2,54675	0,88051	0,04195	0,43211	8	62168	11/11/2010	1,25184	2,04493	1,31262
P1-O-06/11	1,009	0,31944	1,05593	1,05593	1,7179	0,50758	0,0246	0,57295	8	6125	06/11/2010	0,7875	1,10694	1,08053
P1-O-09/11	1,36538	1,07505	1,22796	1,22796	2,83407	0,50913	0,02192	0,74075	8	19700	09/11/2010	1,21912	2,29417	1,24988
P1-O-11/11	1,48992	1,47112	1,24741	1,24741	2,84618	0,68666	0,0534	0,61415	8	23418	11/11/2010	1,22733	2,69845	1,30081
P1-O-16/11	1,51821	1,33059	1,26667	1,26667	3,06109	0,60784	0,05292	0,71175	8	28480	16/11/2010	1,25867	2,58926	1,31959

A partir dessa tabela, fizemos várias análises, que são apresentadas nos gráficos a seguir, lembrando que somente foram considerados as análises cujos

gráficos continham 4 ou mais pontos. Pelo número de gráficos ser muito grande, apresentamos aqui somente uma parte deles para cada análise. Como os dados de $\alpha(q=1)$ e $f(q=1)$ são iguais, as análises de $f(q=1)$ não serão mais apresentadas.

Na figura 44 temos $\alpha(q=1)$ e na figura 45 $\alpha_{\min}$. Todas as análises foram feitas em relação à área das raízes para cada amostra em cada etapa do experimento.

Na figura 46 apresentamos a análise da área das raízes pela porcentagem de água em cada dia do experimento, essa análise é um pouco diferente das outras, pois, não é realizada para cada amostra, e sim por dia de imagem, pois assim tem-se valores diferentes de % de água para a análise.

Em cada gráfico dessas análises, foram obtidas retas e coeficientes de determinação, e os valores de $R^2 > 0,85$ foram considerados como confiáveis, portanto, os parâmetros que se enquadraram nessa consideração continuaram a ser analisados. A partir de agora, as análises passam a ser feitas sobre as inclinações e intersecções de cada reta. Os dados que continuaram a ser considerados estão apresentados nas próximas tabelas.

Figura 44 - Gráficos de algumas amostras de $\alpha(q=1)$ pela da área das raízes. Cada ponto do gráfico é relativo a um dia de medida da amostra. Na primeira coluna de gráfico são amostras com 4% de água, na segunda coluna são amostras com 5% de água, na terceira 6% e na quarta 8%. As análises com forte correlação ($R^2 > 0,85$) foram mantidas nas análises, como pode-se observar pelo exemplo da figura, é a maioria dos casos.

Figura 45 - Gráficos de algumas amostras de $\alpha_{\min}$ pela da área das raízes. Cada ponto do gráfico é relativo a um dia de medida da amostra. Na primeira coluna de gráfico são amostras com 4% de água, na segunda coluna são amostras com 5% de água, na terceira 6% e na quarta 8%. As análises com forte correlação ($R^2 > 0,85$) foram mantidas nas análises, como pode-se observar pelo exemplo da figura, é a maioria dos casos.

Figura 46 - Gráficos de alguns dias de experimento da área das raízes das amostras nesse dia pela porcentagem de água. Cada ponto do gráfico é relativo a uma amostra. As análises com forte correlação ($R^2 > 0,85$) foram mantidas nas análises, como pode-se observar pelo exemplo da figura, é a maioria dos casos

As imagens com forte correlação nas análises são as que possuem $R^2 > 0,85$ nos gráficos de sensibilidade, como mostrados nas figuras anteriores. Montamos uma tabela que contém os nomes das imagens com $R^2 > 0,85$, o valor de R^2 , o valor da inclinação e da intersecção da reta do gráfico de sensibilidade, o valor do coeficiente de determinação e a % de água da amostra. Os parâmetros que possuíam imagens com $R^2 > 0,85$, e que deram continuidade na análise foram: $\alpha(q=0)$, $\alpha(q=1)$, $f(q=0)$ e α_{min} . Como exemplo, é apresentada, na tabela 10, a tabela descrita nesse parágrafo para $\alpha(q=1)$.

A tabela 11 é um pouco diferente da tabela 10, pois a análise feita para o parâmetro de área das raízes não é realizada por amostra, e sim por dia de imagem, como pode ser observado na tabela.

Tabela 10 - Valores das inclinações e intersecções nas retas das imagens cujos valores de $R^2 \geq 0,85$ para a análise do parâmetro $\alpha(q=1)$.

imagem	inclinação	intersecção	R2	%água
P1-A	2,00E-05	0,9495	0,8959	4
P2-A	5,00E-06	1,0773	0,9643	4
P2-B	5,00E-06	1,0166	0,9761	4
P2-C	4,00E-06	1,1079	0,9863	4
P2-D	7,00E-06	0,949	0,9235	4
P3-A	8,00E-06	0,8655	0,9579	4
P3-B	5,00E-06	1,0426	0,9863	4
P3-C	7,00E-06	0,9596	0,9743	4
P3-D	6,00E-06	1,0332	0,9413	4
P1-F	1,00E-05	0,9926	0,9832	5
P1-G	9,00E-06	1,063	0,9288	5
P1-H	7,00E-06	1,0923	1	5
P2-E	5,00E-06	0,9975	0,954	5
P2-F	5,00E-06	1,0617	0,9726	5
P2-G	5,00E-06	1,016	0,9514	5
P2-H	5,00E-06	1,0132	0,9844	5
P3-E	6,00E-06	1,0267	0,9637	5
P3-F	5,00E-06	1,0445	0,9795	5
P3-G	6,00E-06	0,9891	0,9036	5
P3-H	6,00E-06	0,9772	0,9792	5
P1-I	1,00E-05	0,9744	0,9456	6
P1-L	9,00E-06	1,0459	0,9994	6
P2-I	5,00E-06	0,9785	0,924	6
P2-J	6,00E-06	1,0171	0,875	6
P2-L	5,00E-06	1,0044	0,9652	6
P3-J	5,00E-06	1,0665	0,9169	6
P3-L	7,00E-06	0,9193	0,9545	6
P1-M	1,00E-05	1,0167	0,9737	8
P1-O	1,00E-05	1,0075	0,9511	8
P2-M	5,00E-06	0,9977	0,9857	8
P2-N	1,00E-05	0,8198	0,9374	8
P3-M	5,00E-06	1,041	0,9775	8
P3-N	6,00E-06	0,986	0,9688	8
P3-O	8,00E-06	0,9168	0,9481	8

Tabela 11 - Valores das inclinações e intersecções nas retas das imagens cujos valores de $R^2 \geq 0,85$ para a análise do parâmetro da área da raiz pela porcentagem de água da amostra.

Dia da Imagem	inclinação	intersecção	R2
09/12/2010	-2,67E+03	47827	0,7573
11/12/2010	-3,42E+03	56411	0,8062
13/12/2010	-3,12E+03	70028	0,7844
20/12/2010	6,43E+03	48376	0,7357
10/01/2011	2,94E+03	13465	0,7001

Como as análises devem ser feitas em relação à porcentagem de água nas amostras, para que o estresse hídrico seja observado, utilizamos os dados descritos e apresentados anteriormente e tomamos a média dos valores da inclinação e intersecção da reta e do R^2 para cada concentração de água.

Na tabela 12 são apresentados os dados médios do parâmetro $\alpha(q=1)$, como exmplo. Lembrando que essa análise, como já foi dito anteriormente, foi realizada também para os parâmetros $\alpha(q=1)$, $f(q=1)$, $f(q=0)$ e $\alpha_{\min}$.

Como a medida da área das raízes pela porcentagem de água é realizada de modo diferente, e não possui valores de intersecções e inclinações de reta em relação à concentração de água, realizou-se as medidas sobre os dados apresentados na tabela 11, pois são suficientes para a próxima análise.

Tabela 12 - Valores médios das inclinações e intersecções nas retas das amostras com mesmo percentual de água e a média do valor de R^2 para a análise do parâmetro $\alpha(q=1)$. Todos os dados possuem forte correlação ($R^2 > 0,85$).

imagem	inclinação	intersecção	R2	%água
MÉDIA 4%	6,00E-06	1,0166	0,9643	4
MÉDIA 5%	6,00E-06	1,016	0,9726	5
MÉDIA 6%	6,00E-06	1,0044	0,9456	6
MÉDIA 8%	8,00E-06	0,9977	0,9688	8

Com os dados das médias das inclinações e intersecções das retas, foram realizadas as próximas análises. Para cada parâmetro, analisamos a inclinação da reta e a intersecção separadamente em relação à concentração de água nas amostras, e para a análise da área da raiz, foi realizado um gráfico da inclinação e intersecção da área da raiz em relação aos dias das medidas.

Sobre essa análise foram obtidas as retas e os valores de R^2 , de forma semelhante à análise anterior, utilizamos como forma de determinação dos parâmetros com

informações confiáveis aqueles com $R^2 > 0,7$. O erro aceitável foi maior que o anterior devido ao número menor de análises existentes, porém 0,7 ainda é um valor confiável para o erro da medida em consideração.

Seguindo esse padrão, podemos considerar os valores da inclinação e intersecção da reta de $\alpha(q=1)$ e $\alpha_{\min}$ e a intersecção da reta para a área das raízes como parâmetros sensíveis ao estresse hídrico do crescimento de raízes de batata, logo é possível o estudo da relação entre a falta de água no ambiente de plantação da batata através dessa metodologia. Esses resultados são apresentados nas figuras a seguir, na figura 47 tem-se a análise da inclinação da reta do parâmetro $\alpha(q=1)$, na figura 48 a análise da intersecção da reta do parâmetro $\alpha(q=1)$, na figura 49 tem-se a análise da inclinação da reta do parâmetro $\alpha_{\min}$, na figura 50 a análise da intersecção da reta do parâmetro $\alpha_{\min}$, e na figura 51 a intersecção da reta da área das raízes.

Figura 47 - Gráfico dos valores das inclinações médias das retas dos gráficos de $\alpha(q=1)$ x área das raízes para cada porcentagem de água. A análise possui forte correlação $R^2 > 0,7$.

Figura 48 - Gráfico dos valores das intersecções médias das retas dos gráficos de $\alpha(q=1)$ x área das raízes para cada porcentagem de água. A análise possui forte correlação $R^2 > 0,7$.

Figura 49 - Gráfico dos valores das inclinações médias das retas dos gráficos de α_{min} x área das raízes para cada porcentagem de água. A análise possui forte correlação $R^2 > 0,7$.

Figura 50 - Gráfico dos valores das intersecções médias das retas dos gráficos de $\alpha_{\min}$ x área das raízes para cada porcentagem de água. A análise possui forte correlação $R^2 > 0,7$.

Figura 51 - Gráfico dos valores das intersecções médias das retas dos gráficos de área das raízes x % de água para cada dia da imagem. A análise possui forte correlação $R^2 > 0,7$.

Figura 52 - Gráfico do espectro de singularidade. O destaque em vermelho mostra a área dos parâmetros que são sensíveis ao estresse hídrico. Figura adaptada de (64)

Através da figura 52, fica claro que os parâmetros sensíveis ao estresse hídrico são os do lado esquerdo do gráfico do espectro de singularidade, o que representa que o sistema é não-homogêneo, ou seja, multifractal, e que as regiões analisadas são as correspondentes às métricas (raízes).

Esse estudo mostra que o crescimento das raízes de batata segue um padrão multifractal e que é possível a utilização da metodologia apresentada nesse trabalho para o estudo desse crescimento com os parâmetros sensíveis ao estresse hídrico. Conclui-se portanto, que os parâmetros $\alpha_{\min}$, $\alpha(q=1)$ e a intersecção da reta para a área das raízes podem ser utilizados em estudos para avaliar os efeitos do estresse hídrico em cultivos de batata.

O parâmetro α está relacionado com a energia interna do sistema, e como a raiz possui uma grande energia interna, portanto, esse parâmetro descreve a concentração de raiz no sistema (quantidade de massa), já que a energia interna que existe na imagem é devido a raiz.

Além disso, em estudos futuros, podem ser explorados outros parâmetros que também interferem no desenvolvimento e produtividade da planta em cenário de aquecimento global. Exemplos de parâmetros que podem ser estudados são: temperatura ambiente, quantidade de nutrientes, compactação do substrato e granularidade das partículas do substrato.

6 CONCLUSÕES

A motivação para esse trabalho foi obtida pelo fato de a batata ser o terceiro produto alimentar mais importante no mundo, e a diminuição da produtividade dessa planta poderia ocasionar a fome em diversas populações no mundo. Como o aquecimento global é uma possível causa de diminuição de produtividade da cultura de batata, foi realizado, com sucesso através desse trabalho, um estudo sobre um dos efeitos do aquecimento global, o estresse hídrico.

O sistema de cultivo de batata, desenvolvido nesse trabalho, mostrou-se eficaz. As plantas se desenvolveram em um sistema hidropônico de areia branca, com uma solução de nutrientes que permitiram o cultivo dessa planta. Além disso, o tamanho do recipiente, apesar de ser restritivo, foi suficiente para que as raízes se desenvolvessem, gerando resultados para esse estudo.

A imagem de ressonância magnética, através da sequência Turbo RARE 3D, foi eficiente na definição das raízes na imagem. Pôde-se acompanhar o desenvolvimento das raízes com o passar do tempo, mesmo as raízes mais finas.

A análise multifractal realizada nas imagens foi bem sucedida, através dela alguns parâmetros mostraram-se sensíveis ao estresse hídrico, resultando em informações sobre o sistema. Primeiramente, observamos que o sistema é multifractal, através do comportamento do espectro de singularidade. Portanto, a análise multifractal pôde ser utilizada.

Em segundo lugar, vimos que alguns parâmetros mostraram-se sensíveis ao estresse hídrico, esses parâmetros são α_{min} e $\alpha(q=1)$, assim como a intersecção da reta para a área das raízes. Os parâmetros sensíveis mostram que o resultado foi bem sucedido, pois todos esses parâmetros são relacionados à presença de raiz no sistema, portanto, eles descrevem justamente o desenvolvimento da raiz na situação de estresse hídrico.

O parâmetro da área da raiz, descreve o desenvolvimento espacial de raiz na imagem. Portanto, por esse parâmetro, temos toda a informação espacial do desenvolvimento da raiz relacionada com o estresse hídrico.

Já o parâmetro α está relacionado com a energia interna do sistema, portanto ele descreve a concentração de raiz no sistema sendo diferente para casos com

estresse hídrico e irrigação normal. Além disso, como por parâmetros são para α_{min} e $\alpha(q=1)$, estamos descrevendo justamente as regiões correspondentes às métricas associada à presença de raízes, portanto, estamos descrevendo as concentrações de raiz no sistema, e diferenciando pelo estresse hídrico.

Portanto, tanto a técnica de IRM quanto a de Multifractal se mostraram promissoras, tornando possível o estudo de raiz de batata de forma não invasiva e não destrutiva. Essa metodologia, além de mostrar ser uma técnica eficaz, é de rápida obtenção de resultado e possibilita o estudo do desenvolvimento da planta durante um longo período de tempo, e permite o acompanhamento do desenvolvimento da raiz por diferentes estádios.

Estudos futuros:

Como sugestão inicial de estudos futuros, a análise multifractal que foi realizada sobre a imagem da projeção 3D em uma determinada direção, pode ser realizada também em outras direções ou então na média de várias direções. Isso evitaria possíveis diferenças espaciais no desenvolvimento das raízes.

Também podem ser explorados outros parâmetros ambientais que interferem no desenvolvimento e produtividade da planta em cenário de aquecimento global. Alguns exemplos de parâmetros que podem ser estudados são: temperatura ambiente, quantidade de nutrientes, compactação do substrato e granularidade das partículas do substrato.

Além disso, um estudo muito importante a ser realizado é o melhoramento genético. Através da verificação da melhor cultivar a se adaptar em ambientes de estresse hídrico, podem-se desenvolver novas cultivares específicas para serem plantadas nesses casos. Além da adaptação a outros parâmetros do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- 1 CIP. **Facts & figures**. 2012. Disponível em <<http://cipotato.org>>. Acesso em: 30 ago. 2012.
- 2 MCCARTHY, J. J. et al. **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 3 VERKMAN, A.S. Water permeability measurement in living cells and complex tissues **Journal of Membrane Biology**, v.173, p. 73–87, 2000.
- 4 TYERMAN, S.D.; NIEMIETZ, C.M.; BRAMLEY, H. Plant aquaporins: multifunctional water and solute channels with expanding roles. **Plant, Cell and Environment**, v.25, p.173–194, 2002..
- 5 TOURNAIRE-ROUX, C. et al. Cytosolic pH regulates root water transport during anoxic stress through gating of aquaporins. **Nature**, v.425, p. 393–397, 2003..
- 6 LEE, S.H.; CHUNG, G. C.; STEUDLE, E. Low temperature and mechanical stresses differently gate aquaporins of root cortical cells of chilling-sensitive cucumber and -resistant figleaf gourd. **Plant, Cell and Environment**, v. 28, p. 1191–1202, 2005.
- 7 JAVOT, H.; MAUREL, C. The role of aquaporins in root water uptake. **Journal of Experimental Botany**, v.54, p. 2035–2043, 2002.
- 8 LOPES, C.A. et al. Uma análise do efeito do aquecimento global na produção de batata no Brasil. **Horticultura Brasileira**, v.29, n.1, jan./mar..2011.
- 9 HIJMANS, R.J. The effect of climate change on global potato production. **American Journal of Potato Research**, v.80, p.271–280, 2003.
- 10 JEFFERIES, R. A.; T.D. HEILBRONN, T.D.; MACKERRON, D.K.L. Water stress as a constraint on growth in the potato crop. 2. validation of the model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.53: p.197–205, 1991.

- 11 JEFFERIES, R.A ; HEILBRONN,T.D. Water stress as a constraint on growth in the potato crop. 1. model development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.53, p. 185-196,1991..
- 12 COSTA, L.D. et al. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress. **Potato Research**, v.40,p.19-34,1997.
- 13 BOWEN, W. Water productivity and potato cultivation.In: KIJNE,J.W.;BARKER, R.; MOLDEN, D.(Ed.). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Cambridge: CABI Publishing, 2003.p.229-238..
- 14 BASU, P.S. et al. Tuber sink modifies photosynthetic response in potato under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.42, p. 25–39,1999.
- 15 VALENTINI, V. et al. Remote sensing of chlorophyll a fluorescence of vegetation canopies: 2. physiological significance of fluorescence signal in response to environmental stresses. **Response to Environmental Stresses**, v.47, p. 29-35,1994.
- 16 MERZLYAK, M.; GITELSON, A. A. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.50, n.5, p. 704-710, 2003..
- 17 CARTER, G.A.; KNAPP,A. K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral Characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, v.88, n.4, p. 677-684, 2001.
- 18 STOLL, M.; B.R. LOVEY, B. R.; DRY,P. R. Hormonal changes induced by partial root zone drying irrigated grapevine **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.350, p.1627-1634, 2000.
- 19 DRY, P.R.; LOVEYS, B. R.; DURING, H. Partial drying of the root-zone of grape. 2. changes in the pattern of root development. **Vitis**, v.39, p. 9-12,2000.
- 20 DOUGLAS, J.S. **Hidroponia**: cultura sem terra. São Paulo: Nobel,1987.
- 21 ALBERONI, R.B. **Hidroponia**: como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso de solo. São Paulo: Ed. Nobel,1997.

22 HAACKE, E.M. et al. **Magnetic resonance imaging: physical principles and sequence design**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

23 ENESCU, B.; ITO, K.; STRUZIK, Z.R. *Wavelet-based multifractal analysis of real and simulated time series of earthquakes*. **Annals of Disaster Prevention Research Institute**, n.47B, 2004. 13p.

24 KANTELHARDT, J. W. **Fractal and multifractal time series**. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0804.0747>>. Acesso em: 12 ago.2012.

25 POSADAS, A.Q.; CRESTANA, S.; ONODY, R. N.; TANUS, A.; PANEPUCCI, C. H., Characterizing and modeling preferential flow using magnetic resonance imaging and multifractal theory. **Working Paper**, n.2007-4.

26 BROWM, M.A. **MRI basic principles and applications**. New York: Wiley Liss, 2003.

27 GIBBY, W.A. Basic principles of magnetic resonance imaging. **Neurosurgery Clinics of North America**, v.16, p.1-54, 2005.

28 HAGEI, M.C.; IWASAKI, M. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. **Ciência Rural**, v.39, n.4, p.1287-1295, 2009.

29 WALTER, L.; CALLIES, R. ; ALTENBURGER, R. Studies of plant systems by in vivo NMR spectroscopy. In: CERTAINES, J. D. de; BOVEE, W.M.M.J.; PODO, F. (Ed.). **Magnetic resonance spectroscopy in biology and medicine** .Oxford: Pergamon Press, 1992.

30 KOCKENBERGER, W. Functional imaging of plants by magnetic resonance experiments. **Trends in Plant Science**, v.6, p. 286–292, 2001.

31 LOPES, C.A.B.; BUSO, J. A. **Cultivo da batata (Solanum tuberosum L.)**. Brasília: EMBRAPA, 1997. (Instruções Técnicas da Embrapa Hortaliças, 8)

32 FAO. INTERNATIONAL YEAR OF THE POTATO 2008: new light on a hidden treasure. 2008. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/011/i0500e/i0500e00.htm> Roma. Acesso em: 30 ago.2012.

33 SILVA, G.O.; PEREIRA, A. S. Seleção em gerações iniciais para caracteres agronômicos em batata. **Horticultura Brasileira**, v.29, p.449-455, 2011.

34 CIP. **Como cresce la papa** . 2012. Disponível em: < <http://cipotato.org>>. Acesso em: 30 ago.2012.

36 WEBSTER, M.D. et al. **Uncertainty analysis of global climate change projections**: report n.73. Disponível em: <http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt73.pdf>. Acesso em:12 ago.2012.

37 VAN LOON, C. The effect of water stress on potato growth, development, and yield. **American Journal of Potato Research**, v.58, n.1, p. 51-69. 1981..

38 GREGORY, P.J.; SIMMONDS, L. P. Water relations and growth of potatoes. In: HARRIS, P. M. (Ed.). **The potato crop**: the scientific basis for improvement. London: Chapman and Hall, 1992..

39 LOPES, C.A. et al. O aquecimento global e a bataticultura no Brasil. Estamos com uma batata quente na mão? **Revista Batata Show**, v.11, n.30, 2011.

40 BEZERRA, F.M.L.; ANGELOCCI, L. R.; K. MINAMI, K. Deficiência hídrica em vários estádios de desenvolvimento da batata. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n.2, p.119-123,1998.

41 MAROUELLI, W.A.; CARRIJO, O. A. Irrigação. In: REIFSCHNEIDER, F. J. B **Produção de batata**. Brasília: EMBRAPA, 1987.

42 OJALA, J.; STARK, J.; KLEINKOPF, G. Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality. **American Journal of Potato Research**, v,67, n.1, p.29-43,1990.

43 JEFFERIES, R. A. Physiology of crop response to drought. In: HAVERKORT A, A. J.; MACKERRON, D. K. L.(Ed.). **Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth**. London: Kluwer Academic Publishers, 1995.

44 DEBLONDE, P.M.K.; LEDENT, J. F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. **European Journal of Agronomy**, v.14, p.31-41, 2001.

45 TOURNEUX, C. et al. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): morphological parameters growth and yield. **Agronomie**, v. 23, n. 2, p. 169-179, 2003.

46 LAHLOU, O.; LEDENT, J. F. Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 2, p. 159-173, 2005.

47 PURCELL, E. M.; TORREY, H. C.; POUND, R. V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. **Physical Review**, v. 69, n. 1-2, p. 37-38, 1946.

48 BLOCH, F.; HANSEN, W. W.; PACKARD, M. The nuclear induction experiment. **Physical Review**, v. 70, n. 7-8, p. 474-485, 1946.

49 FELIX Bloch: biography Nobel prize. Disponível em:
<http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1952/bloch-bio.html>.
Acesso em: 12 fev. 2012.

50 EDWARD Mills Purcell: biography. Nobel prize. Disponível em:
<http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1952/purcell-bio.html>.
Acesso em: 12 fev. 2012.

51 MANSFIELD, P.; GRANNELL, P. K. NMR 'diffraction' in solids? **Journal of Physics C**, v. 6, p. L422-L426, 1973.

52 LAUTERBUR, P. C. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. **Nature**, v. 242, n. 5394, p. 190-191, 1973.

53 PAUL C. Lauterbur: biography. Nobelprize.org. Disponível em:
<http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/lauterbur.html>.
Acesso em: 12 fev. 2012.

54 PETER Mansfield: biography. Nobelprize.org. Disponível em:
<http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/mansfield.html>.
Acesso em: 12 fev. 2012.

55 BLÜMLER, P. W.; WINDT, C. W.; DUSSCHOTEN, D. van. Magnetic resonance of plants. **Nova Acta Leopoldina**, v. 96, n. 357, p. 17-30, 2009.

56 BOTTOMLEY, P. A.; ROGERS, H. H.; FOSTER, T. H. NMR imaging shows water distribution and transport in plant root systems in situ. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.83, n. 1, p. 87–89, 1986.

57 KÖCKENBERGER, W. et al. High resolution NMR microscopy of plants and fungi. **Journal of Microscopy**, v. 214, n. 2, p. 182-189, 2004.

58 SCHEENEN, T. et al. Functional imaging of plants: a nuclear magnetic resonance study of a cucumber plant. **Biophysical Journal**, v. 82, n. 1, p. 481-492, 2002.

59 van AS, H. Intact plant MRI for the study of cell water relations, membrane permeability, cell-to-cell and long distance water transport. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 743-756, 2007.

60 PAIVA, F. F. **Metodologia de imagens de NMR que utiliza um único pulso adiabático de inversão**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

61 PAPOTI, D. **Transdutores de RF para experimentos de imagens em pequenos animais**. 2006. 144 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

62 PANEPUCCI, H. C.; TANNÚS, A. Magnetic resonance imaging. In: CRUVINEL, P. E.; COLNAGO, L. A. (Ed.). **Advances in agricultural tomography**. São Carlos: EMBRAPA, 2000. p. 57-62.

63 PAPOTI, D; VIDOTO, E.L.G.; MARTINS, M. J.; TANNÚS, A. Effects of Crossing Saddle Coil Conductors: Electric Length X Mutual Inductance. **Concepts in Magnetic Resonance B**, v. 37, n. 3, p. 193-201, 2010.

64 JORGE, L. A. C. et al. **Aplicação da técnica multifractal para caracterização de manejo de solo**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008.

65 POSADAS, A. N. D. **Introduccion a la teoria fractal**. La Papa: International Potato Center, 2002.

66 MANDELBROT, B. How long is the coast of britain? Statistical self-similarity and fractional dimension science. **Science**, v. 156, n. 3775, p. 636-638, 1967.

67 POSADAS, A. N. D. **Breve descrição das técnicas multifractal e o método da transformada wavelet módulo máximo (WTMM) geometria fractal**. La Papa: International Potato Center, 2008.

68 MELO, P. C. T.; GRANJA, N. P.; MIRANDA FILHO, H. S.; SUGAWARA, A. C.; OLIVEIRA, R. F. Análise do crescimento da cultivar de batata “Ágata”. **Batata Show**, v. 3, n. 8, 2003. Disponível em:
<http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista08_006.htm>. Acesso em: 12 fev. 2012.

69 AMIN, M. H. G.; HALL, L. D.; CHORLEY, R. J.; RICHARDS, K. S. Infiltration into soils, with particular reference to its visualization and measurement by magnetic resonance imaging (MRI). **Progress in Physical Geography**, v. 22, n. 2, p. 135-165, 1998.

70 SCHENCK, J. F. The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds. **Medical Physics**, v. 23, n. 6, p. 815-850, 1996.

71 TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W.; CARRIJO, O. A. **Fertirrigação em hortaliças**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2004. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 196).

72 BARBADO, J. L. **Hidroponía**. Buenos Aires: Albatros, 2005.

73 CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995.

74 MARTINEZ, H. E. P.; SILVA FILHO, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004.

75 MULLER, D. R.; BISOGNI, D. A.; ANDRIOLO, J. L.; DELLAI, J.; COPETTI, J. Produção hidropônica de batata em diferentes concentrações de solução nutritiva e épocas de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 647-653, 2007.

76 FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia NFT**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1998. (Boletim Técnico 168).

77 CLARK, R. B. Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. **Journal of Plant Nutrition**, v. 5, n. 8, p. 1039-1057, 1982.

78 FACTOR, T. L.; ARAUJO, J. A. C.; KAWAKAMI, F. P. C.; IUNCK, V. Produção de minitubérculos básicos de batata em três sistemas hidropônicos. **Horticultura Brasileira**, v. 25, n. 1, p. 82-87, 2007.

79 ANDRIOLO, J.L.; BISOGNIN, D. A.; GODOI, R. S.; BORTOLOTTTO, O. C.; COGO, C.M.; MADALÓZ, J.C.C. Produtividade de tubérculos-semente de batata em cultivo hidropônico com dois substratos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 45., 2005, Fortaleza. **Anais...** Brasília: ABH, 2005. 1 CD-ROM.

80 MEDEIROS, C. A. B.; CUNHA, B.P. Cultivo hidropônico de sementes pré-básicas de batata: formulação da solução nutritiva baseada na quantidade de nutrientes extraída pela cultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 43., 2003, Recife. **Anais...** Brasília: ABH, 2003. 1 CD-ROM.

81 MEDEIROS, C. A. B.; ZIEMER, A. H.; DANIELS, J.; PEREIRA, A. S. Produção de sementes pré-básicas de batata em sistemas hidropônicos. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 1, p. 110-114, 2002.

82 FRAHM, J., HAASE, A.; MATTHAEI, D. Rapid three-dimensional MR imaging using the FLASH technique. **Journal of Computer Assisted Tomography**, v. 10, n. 2, p. 363–368, 1986.

83 HAASE, A. et al. FLASH imaging: rapid NMR imaging using low flip angle pulses. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 67, n. 2, p. 258–266, 1986.

84 HENNIG, J.; NAUERTH, A.; FRIEDBURG, H. RARE imaging: a fast imaging method for clinical MR. **Magnetic Resonance in Medicine**, v. 3, n. 6, p. 823–833, 1986.

85 SILVA, E. C.; GIUSTO, A. B.; DIAS, J. A. C. S. Produção de minitubérculos a partir de brotos de batata em diferentes combinações de substratos. **Horticultura Brasileira**, v. 24, n. 2, p. 241-244, 2006.

86 Magalhães, J. R. **Nutrição e adubação da batata**. São Paulo: Nobel, 1985.

87 ROSALES, F.; POSADAS, A.; QUIROZ, R. Multifractal characterization of spatial income curdling: theory and applications. **Advances in Complex Systems**, v. 11, n. 6, p. 861-874, 2008.

88 POSADAS, A. N. D. et al. Multifractal characterization of soil particle-size distributions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1361-1367, 2001.

89 FARAHANI, K.L., R.B. Fluxo, movimento e artefatos por ressonância magnética, In: LUFKIN, R. B. (Ed.). **Manual de ressonância magnética**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1999. p. 70–90.

90 ARENA, L.; MOREHOUSE, H. T.; SAFIR, J. MR imaging artifacts that simulate disease: how to recognize and eliminate them. **Radiographics**, v. 15, n. 6, p. 1373-1394, 1995.

91 CASTRO, N. H. H. **Multifractalidade no código neural da mosca**. 2008. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

92 SOUZA, R.B. **Análise multifractal de séries temporais de focos de calor no Brasil**. 2011. 45p. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) - . Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife - PE, 2011..

93 Malheiros, J. M. **Utilização da técnica de realce por manganês em ressonância magnética no estudo da epilepsia induzida por pilocarpina**. 2010. 77 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Neurologia e Neurocirurgia, Universidade Feredal de São Paulo, São Paulo, 2010.

94 Robbie, D.W.; Moore, E.A.; Graves, M.J.; Prince M.R. **MRI: from picture to proton**. New York: Cambridge University Press, 2003.