

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**ESTIMATIVA DE QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE EM TALHÕES DE
CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA ANÁLISE DA DISPERSÃO DO NDVI
EM IMAGENS DE SATÉLITE.**

Dissertação de Mestrado

Luiz de Gonzaga Malheiros Costa Souza

Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco

Recife

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

Luiz de Gonzaga Malheiros Costa Souza

**ESTIMATIVA DE QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE EM TALHÕES DE
CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA ANÁLISE DA DISPERSÃO DO NDVI
EM IMAGENS DE SATÉLITE.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Sistemas de Geoinformação, no dia 28/02/2011.

Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco

Recife

2011

Catalogação na fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S729e Souza, Luiz de Gonzaga Malheiros Costa.

Estimativa de quebras de produtividade em talhões de cana-de-açúcar através da análise da dispersão do NDVI em imagens de satélite. / Luiz de Gonzaga Malheiros Costa Souza. - Recife: O Autor, 2011.

xi, 45f., il., figs., gráfs.; tabs.

Orientador: Profº. Dr. Admilson da Penha Pacheco.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices.

1. Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2. Sensoriamento Remoto Orbital. 3. Monitoramento de culturas. 4 .NDVI. 5. Cana-de-açúcar. 6. Geoprocessamento. 7. Coeficiente de variação. I. Pacheco, Admilson da Penha. II. Título.

526.1CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-093/2011

658.5 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2010-197

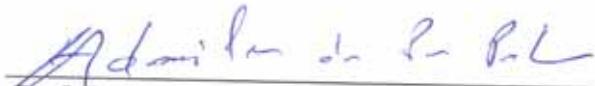
**ESTIMATIVA DE QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE EM
TALHÕES DE CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA
ANÁLISE DA DISPERSÃO DO NDVI EM IMAGENS DE
SATÉLITE.**

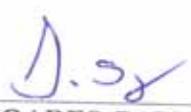
POR

LUIZ DE GONZAGA MALHEIROS COSTA SOUZA

Dissertação defendida e aprovada em 25/02/2011.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. ADMILSON DA PENHA PACHÊCO
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco


Prof. Dr. LENIO SOARES GALVÃO
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE


Prof. Dr. Prof. Dr. SILVIANO JACKS DOS ANJOS GARNÉS
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a Rozalha, minha esposa, amiga
e incansável incentivadora.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, pelos conhecimentos transmitidos e em especial ao Professor Doutor Admilson da Penha Pacheco pela eficiente orientação, confiança e apoio sem os quais este trabalho não seria possível.

Agradeço aos professores Doutor Sílvio Jacks dos Anjos Garnés , Doutor Lênio Soares Galvão e ao professor Doutor Jorge Antonio Silva Centeno, pelas valiosas contribuições a este estudo.

Agradeço também aos colegas da Gerência de Geoprocessamento da PROCENGE Ltda., o analista Fernando Maia pelo suporte durante as minhas ausências, ao matemático Marcos Artur Gonçalves pela ajuda e ao Superintendente de Projetos Estratégicos, Sr. Silvio Dantas, pela oportunidade.

Ao Grupo Tereos e aos engenheiros agrônomos Marcelo Vasconcelos e César Choueiri agradeço pelo auxílio durante a realização dos trabalhos e pela disponibilização dos dados.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XII
1 Introdução	1
1.1 A produção de cana-de-açúcar no Brasil e o sensoriamento remoto....	3
1.2 Estimativas de produtividade	5
2 Fundamentação teórica.....	8
2.1 Sensoriamento Remoto	8
2.2 CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres	8
2.3 Índices de Vegetação	12
2.4 <i>Normalized Difference Vegetation Index - NDVI</i>	13
2.4.1 Dispersão dos valores do NDVI nos talhões.....	14
2.4.2 Correção do valor do NDVI.....	15
2.5 Métodos de Análise da Homogeneidade dos talhões.....	17
2.6 A Homogeneidade dos talhões e a determinação das quebras	18
3 Material e métodos	19
3.1 Caracterização da área de estudo	19
3.1.1 Seleção dos talhões.....	20
3.2 Métodos	21
3.3 Preparação dos dados	22
3.4 Tratamento das imagens	24
3.5 Georreferenciamento dos dados vetoriais e tabulares.....	24
3.6 Cálculo dos parâmetros de análise da variabilidade	25
3.7 Integração Sensoriamento Remoto e SIG	26
3.8 Cálculo da Produtividade Real	27

4	Resultados e discussões.....	28
5	Conclusões.....	39
6	Referencias bibliográficas.....	40
	APÊNDICE I – EXEMPLO DOS DADOS EXTRAÍDOS DA IMAGEM.....	41
	APÊNDICE II – ROTINA VB PARA CÁLCULO DO CV.....	42
	APÊNDICE III – DADOS ORIGINAIS DE QUEBRA POR TALHÃO.....	46

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da análise da dispersão dos valores do índice de vegetação NDVI (Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada) na estimativa da quebra de produtividade dentro de talhões de cana-de-açúcar, responsável por transtornos na execução do planejamento agroindustrial das usinas de açúcar e álcool, chegando, em casos extremos, a provocar a paralisação da operação de moagem da cana. Para tanto foram usadas imagens do satélite CBERS-2B, da safra 2008/2009, obtidas no início da colheita, cujos valores de NDVI foram calculados para cada talhão. A dispersão dos valores do NDVI no talhão foi avaliada empregando-se o Coeficiente de Variação (CV) da média cuja correlação com a quebra de produtividade informada pela usina foi analisada pelo Coeficiente de Correlação. O CV apresentou um Coeficiente de Correlação de 0,7855, avaliando assim positivamente o potencial do método estudado como instrumento de melhoria das informações utilizadas no planejamento agroindustrial das usinas.

Palavras-chave: Geoprocessamento, sensoriamento remoto orbital, monitoramento de culturas, cana-de-açúcar, sistema de informações geográficas, NDVI, coeficiente de variação.

ABSTRACT

This study had to purpose an evaluate the analyzing potential of the dispersion of the values of vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) in detecting abnormalities within parcel of sugar cane, responsible for the productivity loss that many disorders have brought to implementation of industrial planning of sugar and alcohol sector. Therefore, we used the crop images from CBERS in 2008/2009, whose NDVI values were calculated for each parcel. The dispersion of NDVI values was assessed using the coefficient of variation (CV) was analyzed by the correlation coefficient which enabled the detection and quantification of abnormal areas. The results, CV 0,7855, of the determinations were compared with the results of real productivity losses of crops in 2008/2009, of the study area, and evaluating the potential of technology as a tool for improving the information used to support the planning of agro-industrial sugar and alcohol sector.

Key words: Geographic information system, remote sensing, monitoring of crops, sugar cane, NDVI, coefficient of variation.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01 – Coleta de dados em campo	16
Figura 02 – Localização da área de estudo	20
Figura 03 – Talhões selecionados	21
Figura 04 – Fluxo de operações	22
Figura 05 – Modelo de Dados do SIG	26
Figura 06 – Distribuição dos valore de CV e Quebra Real (%).	31
Figura 07 – Distribuição do CV da moda em relação à Quebra %.	35
Figura 08 – Distribuição do CV da mediana em relação à Quebra %.	35
Figura 09 – Distribuição do CV da amplitude em relação à Quebra %.	36
Figura 10 – Efeito das bordas registrado nos valor do NDVI	38

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 01 – Características do CBERS1, 2 e 2B	09
Tabela 02 – Quebra de produtividade e dispersão dos valores de NDVI	28
Tabela 03 – Coeficientes de Variação de parâmetros estatísticos	32
Tabela 04 – Coeficientes de Correlação	36

LISTA DE SIGLAS

ASTER: Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer ou Radiômetro Avançado de Emissão e Reflexão Termal de Dados Espaciais. Instrumento do satélite Terra, lançado pela NASA em 1999, para coleta de imagens de sensoriamento remoto.

CBERS: China-Brazil Earth Resources Satellite ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. Satélite de sensoriamento remoto lançado através de parceria técnico-científica entre Brasil e China.

DXF: Drawing Exchange Format ou Formato para Troca de Desenhos. Formato digital de dados vetoriais utilizado largamente no mercado de CAD (Computer Aided Design).

CCD: Charge Coupled Device ou Dispositivo de Carga Acoplada. Câmera Digital para captura de imagens, transportado por satélite.

EQM: Erro médio quadrático. Foi proposto por Gauss, que o definiu como a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros verdadeiros.

ERP: Enterprise Resource Planning ou Sistema de Planejamento de Recursos Empresariais.

ESRI-ShapeFile: Enterprise System Resourse Institute. Empresa desenvolvedora da plataforma ArcGIS. ShapeFile é um formato utilizado para armazenamento e uso de dados geográficos em GIS.

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus ou Mapeador Temático Estendido. Instrumento do satélite LandSat.

EVI: Enhanced Vegetation Índex ou Índice de Vegetação Estendido. Índice de vegetação que utiliza a banda do azul no seu cálculo.

GPS: Global Positioning System ou Sistema de Posicionamento Global. Sistema de obtenção de coordenadas a partir de recepção de dados emitidos por satélites de constelação específica.

IAF: Índice de Área Foliar. Índice que representa a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo

IKONOS: Satélite de sensoriamento remoto lançado pelos Estados Unidos da América.

LandSat: Satélite americano de sensoriamento remoto.

MERG: Modelo Entidade Relacionamento Geográfico. Notação utilizada para representar os dados geográficos em um modelo conceitual. Esta notação foi desenvolvida pela ESRI.

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ou Espectroradiômetro Imageador de Resolução Moderada. Instrumento de coleta de dados a bordo dos satélites Terra e Aqua.

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada. Índice de vegetação muito utilizado para estudos que envolvem populações vegetais.

QUICKBIRD: Satélite de sensoriamento remoto lançado pelo Canadá.

SIG: Sistema de Informações Geográficas ou do inglês Geographic Information System. Sistema de informações que reúne dados cartográficos e descritivos em uma estrutura informacional unificada.

SPOT: Satélite francês de sensoriamento remoto.

SGBD: Sistema Gerenciador de Banco de Dados. Sistema que controla e armazena os dados dentro de um ambiente informatizado.

TM: Thematic Mapper ou Mapeador Temático. Instrumento do satélite LandSat.

1 Introdução

O Sensoriamento Remoto Orbital tem sido aplicado como ferramenta de apoio à gestão agrícola de várias culturas, inclusive a cana-de-açúcar, com sucesso. No entanto, a escala da análise tem se limitado a grandes áreas, fornecendo aos interessados informações sobre a produtividade média e auxiliando na estimativa do volume das safras. Estas informações são relevantes para uma gestão estratégica e para políticas governamentais, mas a demanda por informações operacionais e táticas, para o setor sucroalcooleiro, não são atendidas por este tipo de informação demasiadamente macroscópica.

Para AGUIAR (2007) A informação sobre a variação nas quantidades de cana colhida ao longo da safra é importante dentro de um sistema de estimativa de safra, pois “está diretamente ligada à disponibilidade de matéria prima para a produção de açúcar e de álcool”. As unidades agroindustriais planejam a sua operação de colheita e industrialização dos seus produtos com base em estimativas da produção, sendo esta informação estratégica para o sucesso do ciclo de produção.

Diferenças significativas entre a produtividade estimada e a atingida, tanto para mais como para menos, podem ocasionar transtornos operacionais em praticamente todas as etapas da operação, seja no corte e colheita, transporte e processamento industrial dos produtos.

Assim sendo, informações que auxiliem o conhecimento destas diferenças, chamadas de “quebras de produtividade” são muito importantes para que as usinas planejem toda a logística envolvida na operação de corte/carregamento e transporte, bem como toda a operação industrial necessária.

Considera-se “quebra de produtividade” a diferença entre a produtividade estimada, esta calculada pelos técnicos da usina através de métodos tradicionais largamente empregados pelo setor, envolvendo amostragem e análise laboratorial, e a produtividade real calculada após a colheita, obtida pela razão entre a produção e a área colhida.

Segundo SEGATO (2006) o planejamento agrícola obedece ao planejamento industrial dimensionando “os recursos humanos (cortadores, motoristas, tratoristas, etc.) e materiais (caminhões, guinchos, tratores, colhedores, transbordos, caminhões bombeiro, caminhões oficina). Um dimensionamento adequado ou não determina o sucesso ou fracasso do fomento e o lucro ou prejuízo da operação.”.

Todo o planejamento tem como base a produção estimada, em nível gerencial e a produtividade estimada em nível operacional, uma vez que esta leva em consideração a localização e a tempestividade da produção em cada área a ser colhida, influenciando a operação logística.

As usinas estimam a produtividade com base em vários métodos, porém a detecção de falhas de produção ocorridas no interior dos talhões, principalmente quando a população vegetal destes talhões já se encontra em estágio avançado de crescimento, não é facilmente realizada, pois não é mais viável a entrada de um técnico para a observação dentro do talhão.

Aviões agrícolas já foram empregados para facilitar a visualização do interior do canavial, mas além de caro o processo não garante a coleta de todas as informações de localização das ocorrências, por conta da velocidade da observação visual necessária, principalmente em se tratando de grandes plantações.

A avaliação feita pelo lado de fora dos talhões, prática muito comum em grandes áreas, demanda uma maior experiência do técnico responsável e sofre com o chamado “efeito das bordas” fenômeno que provoca o comportamento diferente das plantas situadas nas bordas dos talhões tornando-as não representativas da situação das plantas do interior dos talhões. Este efeito foi verificado neste trabalho sendo comprovada a sua influência no valor do NDVI e na dispersão dos mesmos dentro do talhão.

Desta forma as estimativas atualizadas mensalmente, situação comumente adotada por usinas de alta tecnologia, acabam tendo a qualidade da estimativa de produtividade degradada pela dificuldade operacional de obter amostras mais

representativas e também pela incapacidade de detectar anormalidades no interior dos talhões de áreas extensas.

Este trabalho tem como base a determinação da homogeneidade do talhão como método para estimar as quebras de produtividade que ocorrem nos talhões.

A premissa que norteia este estudo é que existe uma correlação entre a homogeneidade das plantas dentro do talhão e a capacidade do mesmo de atingir a produtividade estimada.

A pesquisa foi realizada a partir de informações de quebras reais de produtividade, medidas após o processo de colheita, estimativas mensais realizadas pelos técnicos da usina estudada e imagens de satélite obtidas no mês anterior à colheita da cana.

O estudo correlacionou os valores da dispersão do *NDVI- Normalized Difference Vegetation Index*, índice de vegetação mais intensamente utilizado para estudos que envolvem populações vegetais, MOREIRA (2000), com os valores das quebras ocorridas na safra estudada.

A importância da exploração canavieira para a economia brasileira justifica a procura por métodos científicos que auxiliem os gestores e técnicos a planejarem com mais eficiência a operação agroindustrial das unidades do setor.

1.1 A produção de cana-de-açúcar no Brasil e o sensoriamento remoto.

O Brasil detém uma avançada tecnologia canavieira, reconhecida internacionalmente, capaz de apoiar uma produção que chega a 50% do etanol e a 32% do açúcar mundial. O segmento sucro-alcooleiro, em franco crescimento, é composto por 367 usinas em operação e 29 em implantação. A área cultivada com cana-de-açúcar é de 6,62 milhões de hectares (2008) com uma produção de 528 milhões de toneladas de cana, gerando 10,1 bilhões de litros de álcool e 33,1 milhões de toneladas de açúcar. (Fonte: Jornal da Cana-2010)

Segundo SEGATO (2006) “O etanol, derivado da cana-de-açúcar, figura como a alternativa energética que mais atende às preocupações das economias mundiais: é renovável, polui menos e, principalmente, pode reduzir a dependência do petróleo, cuja era, sabidamente, está chegando ao fim.”. Existem duas maneiras de incrementar a produção: aumentando a área plantada e aumentando a produtividade.

Segundo MOREIRA (2000) no Brasil vários estudos foram realizados ao longo das últimas três décadas que comprovam o potencial das imagens de sensoriamento remoto e dos SIGs para estimar áreas de culturas agrícolas. “Dentre as culturas mais estudadas pode-se citar a cana-de-açúcar”.

Para MACHADO (2003) O monitoramento e estimativa da quantidade de biomassa da cana-de-açúcar são de fundamental importância no planejamento das atividades de condução, colheita, transporte, processamento e comercialização da produção.

O monitoramento da cultura da cana-de-açúcar através do sensoriamento remoto é objeto de vários estudos: PONTES (2005) interpretou a evolução temporal de índices vegetativos em cana-de-açúcar, empregando imagens LandSat7 ETM+, correlacionando-os com índices de produtividade para estimativas de safras; BUENO (2008) descreveu a evolução da área de cana-de-açúcar colhida no quadriênio 2004-2007 no noroeste paulista, através de imagens do satélite CBERS-2, identificando incremento da área colhida da ordem de 2%, entre 2004 e 2006 e decréscimo de 1% em 2007; REIS (2009) mapeou áreas de rebrota, cana jovem, cana média e cana adulta a partir de imagens LandSat-TM, analisando a textura, o nível de radiância e a geometria dessas áreas; RAMME et al. (2010) observou mudanças fenológicas na cana-de-açúcar, através de imagens do satélite MODIS (MOD09Q1).

O sensoriamento remoto tem sido aplicado na identificação e quantificação das áreas plantadas e na estimativa da produtividade, auxiliando muito no planejamento operacional das usinas. No entanto, as ferramentas usadas não monitoram o desenvolvimento comparativo das plantas, fato que acaba não ajudando o gestor a evitar a surpresa causada pelas “*quebras de produtividade*”, que são desvios entre a produção prevista e a produção real que chega ao final do cultivo, na hora do corte e transporte.

A agroindústria canavieira pode ser dividida em três grandes centros de custo:

- a) Área agrícola: Responsável pela produção da cana-de-açúcar;
- b) área de logística: Responsável pelo corte e transporte da cana, e
- c) área industrial: Responsável pela transformação e industrialização dos derivados da cana-de-açúcar.

As três áreas são fortemente impactadas pelas diferenças entre a produção estimada e a produção real, colhida ao cabo do período de cultivo da cana.

A área agrícola é pressionada a produzir o volume estimado, sem “quebras”, de maneira que o plano de corte e transporte não seja afetado por surpresas nos volumes esperados. Em casos extremos uma usina pode até parar a sua operação por falta de cana na moenda, como ocorrido na região de Araçatuba na safra de 2008.

Pelo exposto fica clara a problemática do controle da situação fitossanitária e fisiológica da população vegetal de um talhão, cujo desenvolvimento homogêneo e padronizado é a garantia de sucesso na execução dos eventos operacionais (corte, transporte e industrialização), todos baseados na estimativa da produção.

Na prática apenas usinas de alta tecnologia como COSAN, Nova América e San Martinho possuem equipes devidamente capacitadas no uso do sensoriamento remoto orbital, gerando uma demanda por métodos que possam ser automatizados de maneira que os usuários não precisem de uma maior especialização.

1.2 Estimativas de produtividade

Para RUDORFF (1985) a estimativa do volume produzido em grandes áreas por métodos convencionais “apresenta limitações no que se refere à coleta dos dados. As flutuações na produtividade, que se observam de ano para ano, são causadas em grande parte pelas condições meteorológicas, muito embora outros fatores ambientais, além de fatores agronômicos, também exerçam importante influência sobre estas flutuações”.

O método tradicional de estimativa de produtividade utilizado pelas usinas foi descrito por MACHADO (2003): "A estimativa é feita através da visita dos técnicos às lavouras antes do início da safra e depende muito da experiência dos técnicos. Para contornar esta subjetividade, uma prática objetiva também é realizada, pouco antes do início da colheita, através da amostragem em algumas áreas canavieiras, onde são contadas e pesadas amostras de colmos distribuídos nos talhões para obtenção da produtividade média". Esta prática tradicional é ainda a mais encontrada nas usinas.

Na análise dos resultados deste trabalho figura a importância da precisão da estimativa da produtividade realizada pela usina estudada. No caso em foco a estimativa é feita mensalmente na tentativa de minimizar os erros da estimativa do mês anterior e assim chegar ao mês da colheita com a maior precisão possível.

Na busca por métodos mais precisos de estimativa de produção, muitos trabalhos têm sido realizados aplicando-se vários métodos. RUDORFF (1985) pesquisou índices vegetativos, correlacionando-os com a produtividade agrícola. O seu trabalho buscou adaptar o modelo Agrometeorológico incorporando o modelo de Índices Vegetativos a fim de obter uma Modelo Agrometeorológico-espectral capaz de estimar a produtividade, especificamente, da cana-de-açúcar, concluindo que o índice de correlação entre a produtividade observada e o índice vegetativo estudado foi significativo ao nível de 1% de probabilidade e que a inclusão de índices vegetativos no modelo Agrometeorológico pode melhorar a estimativa do volume de cana-de-açúcar produzido.

MACHADO (2003) aplicou imagens multiespectrais do satélite Landsat 7 - ETM+ com diversos índices de vegetação, no mapeamento da variação espacial da biomassa, e testou seu potencial para estimativa da produtividade. O estudo analisou duas passagens por ano, sendo a primeira nos dois meses que antecedem a colheita e a segunda dias antes da colheita. Na área de estudo foram distribuídas amostras de acordo com a variação da resposta espectral. As amostras foram localizadas, demarcadas e colhidas. Foram realizadas análises de correlação entre os valores de produtividade e a resposta espectral. A produtividade estimada pelo modelo apresentou um erro médio de 4,04t/ha e um desvio padrão de 2,47t/ha, resultado que

comprovou a eficiência da utilização da resposta espectral no processo de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, explicando 83% da variação da produtividade.

PICOLI (2006) utilizou agregados de Redes Neurais Artificiais na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. O modelo proposto utilizou como variáveis explicativas: IAF (Índice de Área Foliar), variedade plantada, tipo de solo, estágio de corte, aplicação de vinhaça, ano safra, produtividade de cana-de-açúcar estimada pelos técnicos da Usina e produtividade estimada pelo modelo Agronômico-espectral. O modelo proposto por PICOLI (2006) explicou 66% da variabilidade da produtividade dos talhões com cana soca, cuja média foi de 81,9 t ha⁻¹ e erro médio quadrático (EQM) de 13,9 t ha⁻¹. Ao comparar a estimativa de produtividade obtida pelo modelo proposto com a produtividade real, concluiu-se que o modelo apresentou um erro de apenas 0,5%.

Apesar dos avanços das técnicas e métodos de estimativa da produção, as usinas ainda não estão devidamente preparadas para a aplicação dos avanços citados, sendo na prática, com raras exceções, apenas o método tradicional de estimativa de produtividade aplicado.

2 Fundamentação teórica

A seguir serão discutidos os fundamentos teóricos que nortearam este trabalho, que tem como base o sensoriamento remoto orbital, a estatística aplicada, o sistema de informações geográficas e a agronomia.

2.1 Sensoriamento Remoto

NOVO (1992) definiu sensoriamento remoto como a “utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos e fenômenos sem que haja contato direto entre eles.”

Para LATORRE (1998) o sensoriamento remoto tem sido definido como um conjunto de atividades que tem por objetivo caracterizar as propriedades dos objetos através da detecção, registro e análise do fluxo radiante por eles emitido ou refletido. A essência desta atividade fundamenta-se na identificação e na discriminação de alvos, onde a radiação recebida pelo sensor torna-se a base de todo o processo.

Nesta pesquisa foi utilizado o sensoriamento remoto orbital, sendo este segmento do sensoriamento remoto o responsável pela captura e análise de imagens obtidas por sensores a bordo de satélites artificiais que orbitam a Terra.

2.2 CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

Através de uma parceria técnico-científica entre Brasil e China foi desenvolvido o programa *CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite* ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, cujo objetivo foi lançar e manter uma constelação de satélites de sensoriamento remoto para monitoramentos dos seus respectivos territórios.

O primeiro satélite, o CBERS-1, foi lançado em 14 de outubro de 1999, por um foguete chinês, Longa Marcha 4B, sendo seguido pelo segundo, CBERS-2, em 21 de outubro de 2003 e o terceiro satélite, o CBERS-2B, 19 de setembro de 2007, sendo este o primeiro de um acordo de expansão que inclui ainda os CBERS-3 e 4 a serem lançados.

Quanto aos aspectos técnicos os satélites da série, que já foram lançados, são considerados idênticos, em que pesem algumas melhorias introduzidas no CBERS-2B tais como uma câmera CCD e um sistema de posicionamento por GPS.

Tabela 1 – Características do CBERS1,2 e 2B.

Característica técnicas	
Massa total	1450kg
Potência gerada	1100 W
Baterias	2 x 30 Ah NiCd
Dimensões do corpo	(1,8 x 2,0 x 2,2) m
Dimensões do painel	6,3 x 2,6 m
Propulsão a hidrazina	16 x 1 N; 2 x 20 N
Estabilização	3 eixos
Supervisão de bordo	Distribuída
Comunicação de Serviço (TT&C)	UHF e banda S
Órbita	
Órbita	hélio-síncrona
Altura	778 km
Inclinação da órbita	98.504. ^º
Período	100,26 min.
Círculo	26 dias
Sensores	
WFI - Imageador de Amplo Campo de Visada	
Bandas espectrais	0,63 - 0,69 µm (vermelho) 0,77 - 0,89 µm (infra-vermelho)
Campo de Visada	60 ^º
Resolução espacial	260 x 260 m
Largura da faixa imageada	890 km
Resolução temporal	5 dias
Frequência da portadora de RF	8203,35 MHz
Taxa de dados da imagem	1,1 Mbit/s
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada	31,8 dBm
CCD - Câmera Imageadora de Alta Resolução	
Bandas espectrais	0,51 - 0,73 µm (pan) 0,45 - 0,52 µm (azul) 0,52 - 0,59 µm (verde) 0,63 - 0,69 µm (vermelho) 0,77 - 0,89 µm (infravermelho próximo)
Campo de Visada	8,3 ^º
Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Capacidade apontamento espelho	±32 ^º
Resolução temporal	26 dias com visada vertical (3 dias com visada lateral)

Frequência da portadora de RF	8103 MHz e 8321 MHz
Taxa de dados da imagem	2 x 53 Mbit/s
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada	43 dBm
IRMSS - Imageador por Varredura de Média Resolução (ausente no CBERS-2B)	
Bandas espectrais	0,50 - 1,10 µm (pancromática) 1,55 - 1,75 µm (infravermelho médio) 2,08 - 2,35 µm (infravermelho médio) 10,40 - 12,50 µm (infravermelho termal)
Campo de Visada	8,8°
Resolução espacial	80 x 80 m (160 x 160 m termal)
Largura da faixa imageada	120 km
Resolução temporal	26 dias
Frequência da portadora de RF	8216,84 MHz
Taxa de dados da imagem	6,13 Mbit/s
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada	39,2 dBm
HRC - Câmera Pancromática de Alta Resolução (apenas no CBERS-2B)	
Banda espectral	0,50 - 0,80 µm (pancromática)
Campo de Visada	2,1°
Resolução espacial	2,7 x 2,7 m
Largura da faixa imageada	27 km (nadir)
Resolução temporal	130 dias na operação proposta
Taxa de dados da imagem	432 Mbit/s (antes da compressão)
Quantização	8 bits

Fonte: adaptado do INPE – website oficial (<http://www.cbers.inpe.br> acessado em 9-junho-2010).

A escolha do CBERS para o presente trabalho teve como base as características técnicas do satélite e a disponibilidade de imagens da área de estudo no período adequado ao objetivo deste trabalho. Desta forma foram considerados:

- a) Presença das bandas: Vermelho (0,63 - 0,69 µm) e infravermelho proximal (0,77 - 0,89 µm), necessárias à obtenção do índice de vegetação NDVI (câmera CCD).
- b) Disponibilização de imagens da área de estudo no período de 01 a 30 de outubro de 2008.
- c) Resolução espacial adequada ao trabalho (CCD com resolução de 20mx20m).

Considerando que a unidade informacional das usinas canavieiras é o *talhão*, também conhecido como lote em algumas regiões, e que esta unidade possui

um tamanho médio de 10 ha, ou seja, 10.000 m², a quantidade de pixels analisados por unidade informacional seria dada pela fórmula:

$$NP = \frac{At \times 10.000}{400} \quad (1)$$

Onde:

NP = Número de pixel dentro do talhão

At = Área do talhão em hectares

Foram descartados os talhões que apresentaram um NP < 25.

- d) Período de revisita adequado ao monitoramento do canavial, uma vez que a cultura é anual e o calendário de práticas agrícolas segue um padrão mensal assim como as sucessivas estimativas com base em observações e amostras de campo. Com a resolução temporal de 26 dias, o satélite proporciona a possibilidade da obtenção de até duas imagens mensais. Se considerarmos que a área de estudo não apresenta problemas de cobertura de nuvens significativos, a possibilidade de obter duas imagens mensais é uma vantagem do uso do CBERS.

A possibilidade de utilização de outros satélites foi testada, no entanto por conta de suas características técnicas ou disponibilidade de imagens, acabaram sendo descartados pelas seguintes razões:

- a) Resolução espacial. Imagens com pixels de resolução menor do que 20m x 20m proporcionariam um pequeno número de pixels por talhão, fato que inviabilizaria a análise uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar a dispersão do NDVI, sendo esta sensível ao número de pixels por talhão.
- b) Ausência de banda no infravermelho próximo – Esta banda compõe o NDVI, sendo este o índice de vegetação adotado no trabalho.
- c) Alto custo das imagens – Imagens de alto custo ou de área mínima de compra muito grande, poderiam comprometer a possibilidade de uso pelas usinas menores, diminuindo o alcance prático do presente trabalho.

- d) Indefinição do período de aquisição das imagens – Satélites orientados a missões específicas poderiam inviabilizar a pesquisa por indisponibilidade das imagens no momento mais adequado para a tomada, ou seja, no mês que antecede o início da colheita.

Por estas razões foram descartadas as imagens dos satélites: ASTER, SPOT, MODIS, QUICKBIRD e IKONOS.

2.3 Índices de Vegetação

Ao longo dos anos muitos índices de vegetação foram criados na busca por uma adequada análise da situação da cobertura vegetal da superfície terrestre.

Os Índices de Vegetação são calculados a partir de operações entre bandas espectrais e buscam correlacionar um conjunto de comportamentos espectrais, registrados simultaneamente em bandas espectrais distintas, a uma situação particular da vegetação, desenvolvimento, estádio fenológico ou condição fitossanitária.

A utilização de imagens satelitais para cálculo de índices vegetativos foi descrita com detalhes por RUDORFF (1985) que encontrou um índice de correlação significativo em nível de 1% entre a produtividade e o índice vegetativo utilizado no estudo.

SPANNER et al.(1990), referindo-se aos índices NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) conclui que “análises do padrão destes índices de vegetação têm demonstrado grande consistência com a resposta da vegetação”.

Para PICOLI (2006) os Índices de Vegetação (IV) são indicadores da presença e condição da vegetação. Do ponto de vista das condições que correlacionam os índices de vegetação à produção vegetal, o pesquisador relata que “as propriedades ópticas de uma folha são função de sua composição, morfologia e estrutura interna as quais definem a variação da resposta espectral registrada pelo sensor ao longo da faixa do espectro eletromagnético analisada. Na região do visível (400 a 700 nm) se observa baixa reflectância devido à absorção da radiação incidente pelos pigmentos,

como as clorofitas A e B e os carotenóides; na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) a reflectância das folhas é alta devido às múltiplas reflexões da radiação nas paredes das células; e na região do infravermelho médio o teor de água contido nas folhas é responsável pela absorção em 1400 e 1950 nm diminuindo a reflectância da folha .”

A quantidade de pigmentos fotossintetizantes está intimamente relacionada ao desenvolvimento da planta (estádio fenológico) e à sua saúde (estádio fitossanitário). Desta forma pode-se analisar o valor do NDVI para avaliar, de uma forma geral, o vigor vegetativo, RAFAELLI (2007).

2.4 Normalized Difference Vegetation Index - NDVI

Para RUDORFF (2007) O NDVI-Normalized Difference Vegetation Index- ou Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada, relação entre as refletâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, é o índice mais utilizado em estudos sobre a vegetação.

O NDVI é dado pela equação:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP}-\text{V}}{\text{IVP}+\text{V}} \quad (2)$$

onde,

IVP = Reflectância no Infravermelho Próximo;

V = reflectância no Vermelho.

Embora numericamente os valores do NDVI possam variar entre -1 e 1, a vegetação está associada aos valores positivos.

Segundo MOREIRA (2000) o “NDVI é mais sensível à presença da clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da luz”. Em ultima análise a presença dos pigmentos fotossintetizantes reflete o desenvolvimento e a condição fitossanitária da planta.

Desta forma, a heterogeneidade deste valor em populações que deveriam se apresentar como homogêneas, pois são geneticamente idênticas, cultivadas em um mesmo ambiente e manejadas em bloco, indicaria uma condição anômala.

2.4.1 Dispersão dos valores do NDVI nos talhões

O *talhão* de cana-de-açúcar representa uma área uniforme cujo manejo das plantas é feito em bloco, conforme definido por SEGATO (2006). No processo de informatização das usinas o talhão foi constituído como unidade informacional à qual se vinculam as demais informações de planejamento, execução e controle de todas as operações agrícolas e até econômicas:

- a) Operações de plantio, tratos culturas, colheita e produtividade;
- b) Dados fitossanitários;
- c) Dados pedológicos e climáticos;
- d) Dados de produtividade, e
- e) controle de custos.

Os dados de produtividade e produção são, portanto, armazenados nos sistemas agrícolas por talhão, sendo esta a menor agregação informacional possível no ambiente informático das usinas.

Para fins de comparação dentro deste trabalho, um *talhão* encerra e é representado na imagem por um conjunto de pixels identificado por um código único, este vinculado ao sistema agrícola informatizado da usina. Desta maneira é possível comparar os dados de refletância dos pixels com os dados agronômicos e de produtividade do *talhão* correspondente.

Para os testes foram utilizadas variáveis estatísticas que estudam a distribuição dos dados de um determinado conjunto de dados.

2.4.2 Correção do valor do NDVI

A preparação das imagens consistiu nas operações de correção geométrica, correção atmosférica, cálculo do NDVI, separação dos pixels por talhão, cálculo da média e variância do NDVI por talhão.

Nestas operações o valor do NDVI foi corrigido pelo pixel mais escuro, obtido diretamente da imagem, sendo o conhecimento da verdade de campo utilizado para a localização do pixel central de uma instalação com cobertura negra (galpão de lona plástica), sendo o valor do pixel utilizado na correção dos efeitos atmosféricos.

ZULLO JR. (1994) observou que aplicando a correção atmosférica em algumas superfícies de imagens LandSat os valores observados do NDVI, em uma área de cana, sofreram uma alteração de 0,4 na imagem original para 0,6 na imagem corrigida, demonstrando que, de uma maneira geral, os valores originais são subestimados devido à presença da atmosfera.

A correção atmosférica das imagens foi feita através do método do Pixel Mais Escuro, que segundo CENTENO (2004), estima a parcela correspondente ao espalhamento. Este método utiliza o valor de um pixel, que teoricamente deveria aparecer na imagem como escuro, ou seja, uma região onde a reflectância seria nula, como valor a ser retirado de cada pixel, pois o mesmo seria “originado unicamente do espalhamento atmosférico”.

PONZONI & SHIMABUKURO (2010) descrevem com detalhes o método do Pixel Mais Escuro ou *Dark Object Subtraction-DOS*. Para os dois pesquisadores em “toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral existem pixels que deveriam assumir o valor 0, uma vez que estes poderiam não receber radiação incidente, podendo também absorvê-las totalmente, o que igualmente implicaria em valores nulos de reflexão”.

O método consiste nas seguintes atividades.

- a) Seleção do padrão que representa o pixel escuro.

Nesta pesquisa foram realizadas visitas a campo para a identificação alvos escuros, ou seja, que não recebessem radiação incidente (sombras na região do visível) ou que tivessem a capacidade de absorver totalmente a radiação. Estas áreas foram identificadas em campo e suas coordenadas aproximadas foram capturadas através de um receptor GPS (Global Positioning System) de navegação *GARMIM 12*.



Figura 01 – Coleta de dados em campo para identificação do padrão do pixel escuro. Autor coletando coordenadas na área de estudo.

b) Identificação dos pixels escuros, selecionados em campo, na imagem CBERS.

Utilizando as coordenadas obtidas em campo, foi possível identificar os pixels que representam o padrão escuros e calcular o deslocamento, ou seja o valor que deve ser retirado de todos os pixels da imagem.

A fórmula do método pode ser escrita como:

$$g(x) = f(x) - \text{Min} \quad (3)$$

Onde Min é o valor da correção a ser aplicada, ou seja, o valor existente no pixel que deveria ser zero.

c) Aplicação da correção nos demais pixels da imagem.

A aplicação da correção foi feita diretamente nos valores de NDVI registrados em uma tabela de pixels da imagem. Neste trabalho os valores de NDVI, junto com a identificação do talhão foram exportados para uma tabela e

processados por um software desenvolvido especificamente para esta pesquisa (Apêndice II).

2.5 Métodos de Análise da Homogeneidade dos talhões

A homogeneidade dos talhões foi aferida por meios estatísticos através do cálculo dos parâmetros: Média (\bar{x}), Moda (Mo), Mediana (Md), Variância amostral (s^2), Desvio Padrão da amostra (s) e Coeficiente de Variação (CV). Neste trabalho o CV foi utilizado como parâmetro para estudar a variabilidade do NDVI.

Foram empregadas as fórmulas:

Variância (s^2):

$$s^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / (N - 1) \quad (4)$$

Desvio Padrão (s):

$$s = \pm \sqrt{s^2} \quad (5)$$

Segundo GOMES (1981) o Coeficiente de Variação “aponta a homogeneidade dos dados”, caracterizando a dispersão dos dados em termos relativos ao seu valor médio. Quanto menor o valor, mais homogêneo será o conjunto de dados.

SILVA (2003) utilizou o CV para estudar a variabilidade espacial das características químicas de solos.

O CV, ou CV da média é dado pela fórmula:

$$CV = \frac{100 \times s}{\bar{x}} \quad (6)$$

Os talhões com valor de CV baixos são mais homogêneos. Este valor representa a dispersão do NDVI dos pixels encerrados em cada talhão, que por sua vez reflete o comportamento espectral que deve ser homogêneo para uma mesma variedade de cana, se todas as outras condições envolventes se mantiverem igualmente homogêneas, pressuposto fundamental da divisão da área plantada em talhões.

São condições envolventes: Solo, clima, precipitação, manejo, insumos agrícolas, época de plantio e de corte, idade da planta e tecnologia agrícola utilizada. Todas essas condições são esperadas para um mesmo talhão, tornando-o a unidade informacional dos sistemas de gestão agrícola usados nas usinas.

2.6 A Homogeneidade dos talhões e a determinação das quebras

Para a determinação da influência da homogeneidade da distribuição do NDVI, representado pelo CV, na estimativa das quebras, foi utilizado o Coeficiente de Correlação (ρ) calculado através do software MathWorks – MATLAB (<http://www.mathworks.com>)

Para MEYER (1995) o Coeficiente de Correlação mede o “grau de associação” entre X e Y . Considerando as variáveis aleatórias n-dimensionais X e Y , a matriz de correlação ρ_{xy} é dado pela fórmula:

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (7)$$

Onde x_i e y_i representam o i-ésimo e o j-ésimo componentes das respectivas variáveis x e y , então:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

Sendo $\rho_{X_i Y_i}$ o Coeficiente de Correlação entre as componentes x_i e y_i .

O numerador de $\rho_{X_i Y_i}$ é a covariância entre X_i e Y_i .

O coeficiente de correlação é uma grandeza adimensional.

3 Material e métodos

Este trabalho teve inicio com a coleta de informações sobre a produção e quebras de produtividade diretamente do banco de dados do sistema ERP Agrícola em funcionamento nas usinas da área de estudo.

O ERP (*Enterprise Resource Planning*) Agrícola é um sistema informacional desenvolvido na linguagem de programação *MS-DELPHI 7.0* (<http://www.brothersoft.com/delphi-76437.html>), acessando um banco de dados montado no SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados) *Oracle* ®. (<http://www.oracle.com/br/corporate/contact/index.htm>)

Através do ERP Agrícola os técnicos da Usina têm acesso a todas as informações técnicas e gerenciais sobre o andamento das colheitas, produção, produtividade, características edáficas, fertilidade dos talhões, variedades plantadas, operações agrícolas e índices agrícolas.

O acesso aos dados foi feito através de exportação de dados do SGBD para arquivos em formato texto que foram posteriormente convertidos para o banco de dados da pesquisa, em MS-Access e MS-Excel.

3.1 Caracterização da área de estudo

A área estudada está situada no município de Olímpia, estado de São Paulo, distante 453 Km da capital (Figura 01).

Foram selecionados 102 talhões (Figura 03), cujo tamanho médio foi de 10,89 ha, distribuídos nas Usinas Cruz Alta, Severinia e São José, todas pertencentes ao grupo francês Tereos, proprietário de seis usinas no Brasil e uma em Moçambique.

Com 665.064,59ha, a área de estudo apresenta uma topografia plana à levemente ondulada, sendo a cana-de-açúcar a principal cultura explorada economicamente.

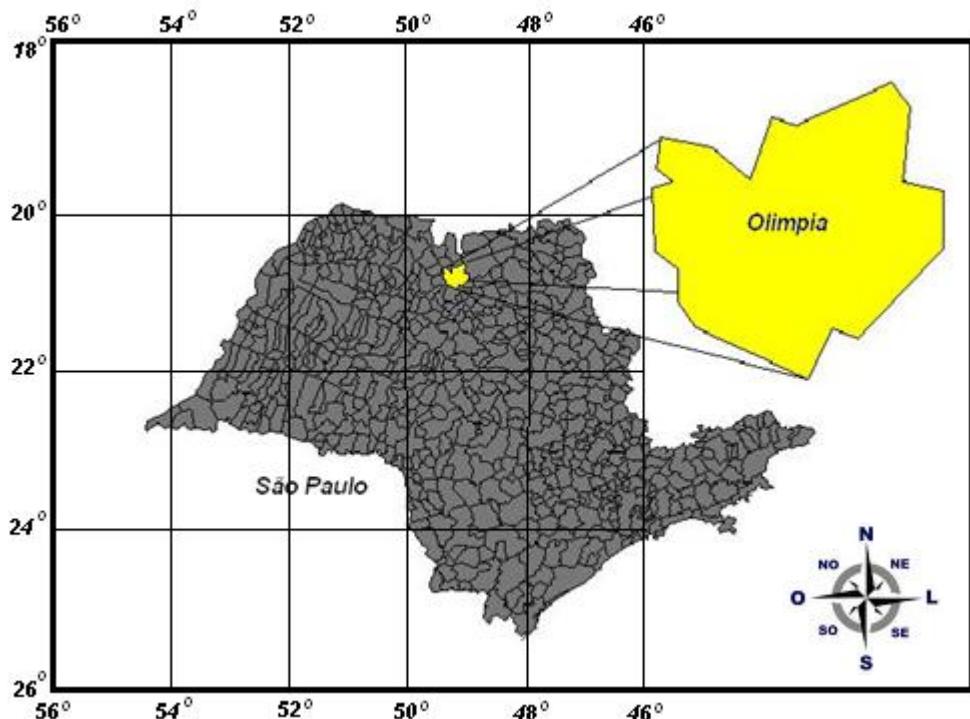


Figura 02 – Localização da área de estudo.

3.1.1 Seleção dos talhões

Os 102 talhões foram selecionados segundo os seguintes critérios:

- Ter apresentado quebra da produtividade na safra 2008/2009;
- Possuir área de moagem idêntica a área do talhão;
- Possuir pelo menos 25 pixels no seu interior;
- Não ter sido colhido antes da data de obtenção da imagem de satélite.

Neste estudo foram consideradas como quebras apenas as diferenças negativas entre a produtividade estimada pela Usina, antes da colheita, e a produtividade real aferida, pois estas são as principais causadoras dos transtornos operacionais nas usinas.

Para os cálculos foram considerados os valores absolutos das quebras.

Foram desprezados os talhões cujo georreferenciamento apresentou falhas que poderiam permitir que pixels externos ao talhão fossem considerados.

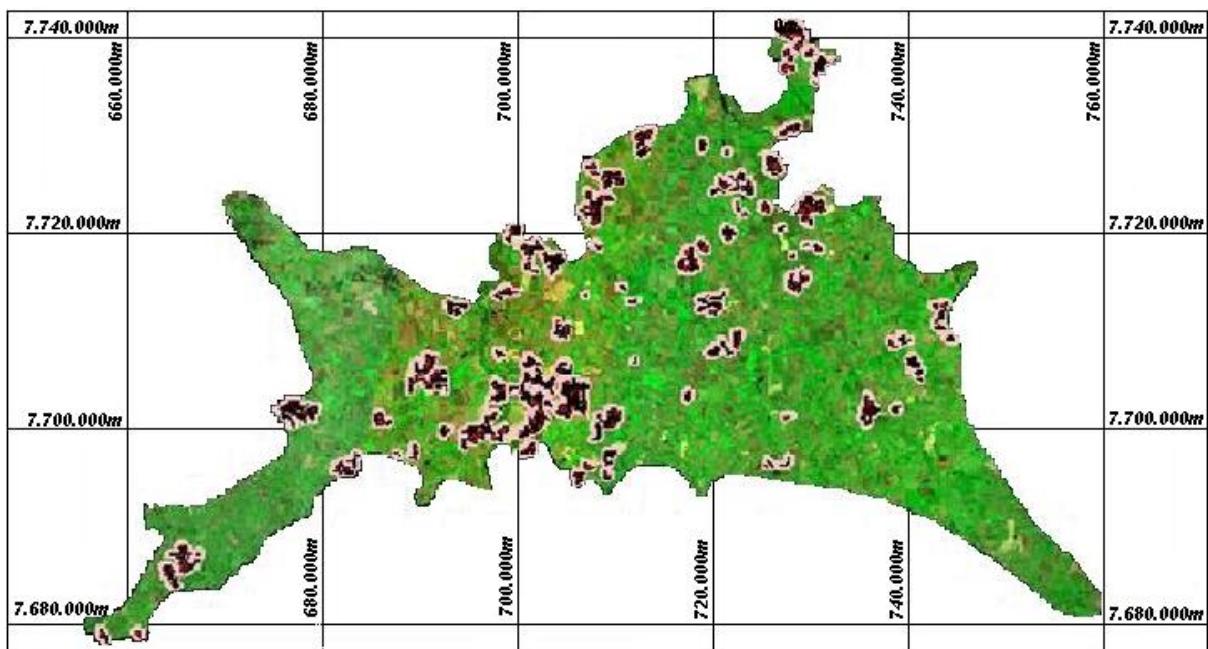


Figura 03 – Talhões selecionados. Carta imagem (UTM/ Zona L23 – SAD69).

3.2 Métodos

Segue um resumo do método empregado e em seguida o seu detalhamento.

Com a obtenção da imagem do satélite CBERS iniciou-se todo o processo de preparação dos dados geográficos. Após o pré-processamento da imagem, que consistiu em corrigir o efeito atmosférico, georreferenciar a imagem e construir um mosaico capaz de cobrir toda a área de plantio e ser contemplada na pesquisa, foram geradas duas imagens resultantes do processo de mosaicagem: Imagem falsa-cor, que foi utilizada para facilitar o entendimento da área estudada e Imagem NDVI, que contempla os valores que serão utilizados na pesquisa.

Com base nos valores dos pixels da imagem NDVI, é gerada uma tabela contendo os valores de NDVI e os dados de identificação do pixel, inclusive as coordenadas que o representam (centro do pixel). Esta tabela é utilizada para vincular os pixels aos talhões, fornecidos pelas usinas em formato vetorial (cartografia da safra).

Uma vez vinculados os pixels aos talhões, são calculados os valores da variância, desvio padrão, média e coeficiente de variação, para cada talhão.

A correlação entre o coeficiente de variação e o valor da quebra de produtividade medida no final da safra, foi feita através da aplicação do coeficiente de correlação.

Segue o fluxo de trabalho da pesquisa e a seguir o detalhamento dos métodos usados.

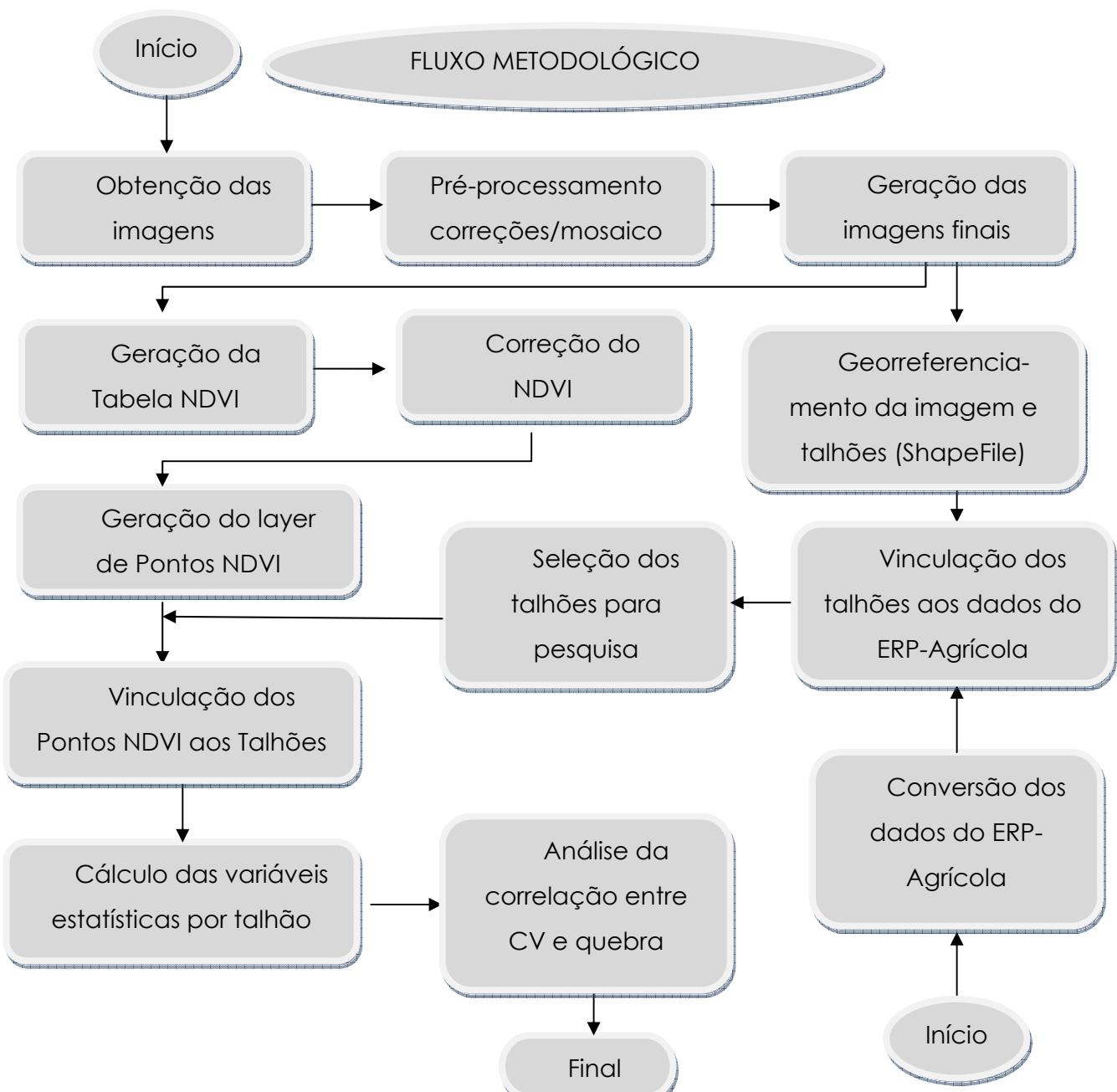


Figura 04 – Fluxo de operações

3.3 Preparação dos dados

Para a execução da pesquisa os dados originais foram tratados através de vários softwares:

a) Oracle 9i

Utilizado para a exportação dos dados da safra 2008/2009 para um arquivo texto contendo:

Identificação do talhão;

Área total (ha);
Área de moagem (ha);
Produtividade estimada no mês de outubro (t/ha);
Data da colheita;
Produção real (t).

b) MS - Access 2007

Empregado para selecionar os talhões cuja quebra de produtividade real atendeu aos critérios descritos no item 3.11.

Os resultados da seleção de talhões foi exportado para a tabela atributos dos talhões (*Features Attributes Table*), armazenada em arquivo no formato *ESRI-ShapeFile*.

c) ESRI - ArcView 3.3

Utilizado para converter os dados cartográficos dos talhões, originalmente em formato AutoDesk-AutoCAD 2000 (.dwg) para o formato *ESRI-ShapeFile*, de forma que os dados resultantes pudessem ser acessados por um Sistema de Informações Geográficas e ter o identificador do talhão vinculado à sua respectiva feição cartográfica.

d) ENVI 4.0

Usado para a mosaicagem e o recorte da imagem.

e) INPE - Spring 3.4

Empregado para realizar o georreferenciamento da imagem, através da transformação afim, com base na cartografia dos talhões e para o cálculo do NDVI. O resultado foi exportado para um arquivo texto contendo as coordenadas do pixel e o valor do NDVI.

f) Aplicativo MS-Visual Basic com MapObjects.

Desenvolvido para vincular o valor do NDVI dos pixels, gerado pelo Spring 3.4, à tabela de atributos dos talhões e posteriormente calcular os parâmetros estatísticos. A listagem da principal rotina do software desenvolvido encontra-se no Apêndice II.

Após a preparação dos dados geográficos, foram calculadas as quebras reais de produtividade dos 102 talhões selecionados.

A quebra de produtividade foi calculada pela fórmula:

$$Q = \frac{(PdR - PdE) \times 100}{PdE} \quad (9)$$

Onde:

Q - Quebra percentual da produtividade

PdR – Produtividade real, medida após a colheita

PdE – Produtividade estimada em outubro 2008

3.4 Tratamento das imagens

Inicialmente foi construído o mosaico das imagens CBERS 2B, obtidas em 20 de outubro de 2008. O mosaico foi composto por duas cenas, órbita-ponto 157 e 158, onde a área de estudo foi recortada, diminuindo assim o número total de pixels a serem processados, de 2 milhões para 112.260 pixels, uma vez que apenas os pixels encerrados nos talhões selecionados foram objeto da presente pesquisa.

O georreferenciamento da imagem foi realizado por Transformação Afim dentro do software SPRING, com base em doze pontos distribuídos nas bordas da imagem, produto da mosaicagem.

3.5 Georreferenciamento dos dados vetoriais e tabulares

A cartografia da safra 2008/2009, originalmente obtida em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) foi convertida para o formato *ESRI-ShapeFile*, os polígonos que representam os talhões foram fechados e receberam um código único que nomeia cada talhão. Esta vinculação foi executada manualmente dentro do software *ESRI-ArcView 3.3*, utilizando como referência mapas em papel fornecidos pela Usina, onde constavam os códigos dos talhões, como topônímia.

Cada talhão foi identificado pelo código do *Bloco*, concatenado com o código do talhão. *Blocos* são conjuntos de talhões que pertencem a uma determinada propriedade rural ou região administrativa de uma usina.

Os dados tabulares dos talhões, constantes na tabela de produtividade, fornecida pela Usina, foram também vinculados às feições do *ESRI-ShapeFile* a partir do código de cada talhão. Os dados dos pixels foram vinculados aos talhões através de uma aplicação específica desenvolvida em *MS-VB 6.0* com *MapObjects Lite*, tendo como dados de entrada uma tabela gerada no software *SPRING* contendo o valor do NDVI e as coordenadas do centro do pixel correspondente. A vinculação destes dados foi realizada a partir da relação de pertinência das coordenadas com os limites dos polígonos dos talhões. Desta forma os dados dos pixels foram transferidos, depois de totalizados, para o arquivo *ESRI-ShapeFile* que representa os talhões.

3.6 Cálculo dos parâmetros de análise da variabilidade

O cálculo dos parâmetros: Média, Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação da média foram realizados através de um aplicativo desenvolvido em *VB 6.0*, armazenando os resultados diretamente no ambiente do software *ESRI-ArcView 3.3*, sendo os dados posteriormente exportados para uma tabela de integração, em *MS-Excel*, a ser utilizada com o software *MATLAB* (Tabela 02).

Para analisar a eficiência do Coeficiente de Variação (CV) da média na identificação da quebra real de produtividade, o mesmo foi comparado com três outros CVs (Tabela 03), calculados pelas fórmulas abaixo.

a) Coeficiente de Variação da Moda:

$$CV_{moda} = \frac{100 \times S_{Mo}}{\text{Moda}} \quad (10)$$

Onde:

$$S_{Mo} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \text{Moda})^2}{n-1}} \quad (11)$$

b) Coeficiente de Variação da Mediana:

$$CV_{mediana} = \frac{100 \times s_{Me}}{\text{Mediana}} \quad (12)$$

Onde:

$$s_{Me} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \text{Mediana})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

c) Coeficiente de Variação da Amplitude:

$$CV_{amplitude} = \frac{100 \times \text{Amplitude}}{\text{Média}} \quad (14)$$

3.7 Integração Sensoriamento Remoto e SIG

Para a execução dos trabalhos foi necessário integrar os dados provenientes do ERP Agrícola da usina com dados da cartografia da safra 2008/2009 e estes com os dados das imagens do satélite CBERS 2B. Para tanto foi necessário modelar um SIG capaz de armazenar e integrar os dados da pesquisa.

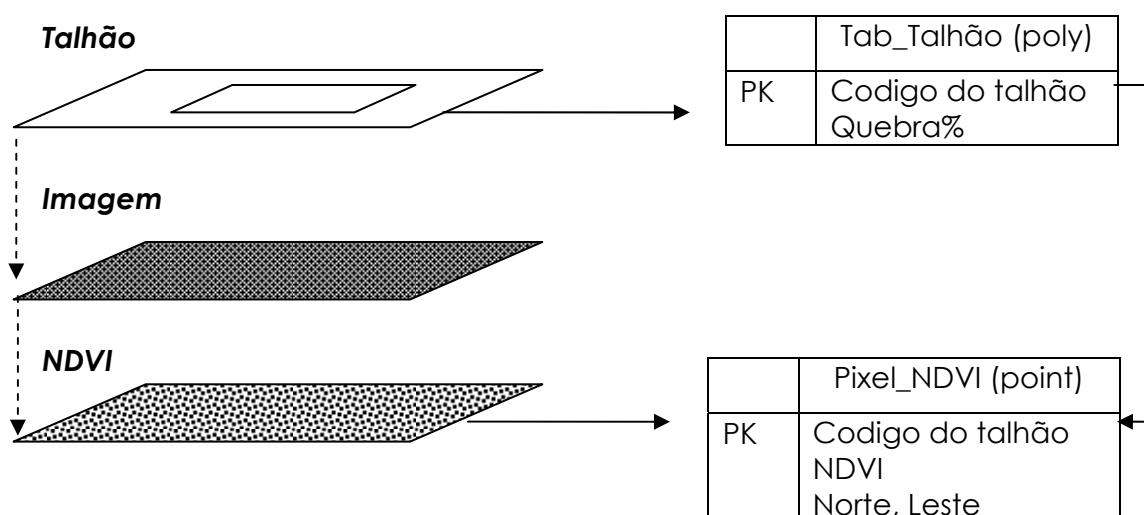


Figura 05 – Modelo de Dados do SIG

O modelo utilizado foi adaptado de JOHNSTON (1991) e denominado de Modelo Entidade Relacionamento Geográfico – MERG. O modelo explicita como as entidades se relacionam de forma geográfica e através dos seus atributos vinculados.

No modelo os valores de NDVI dos pixels foram convertidos de arquivo texto, gerado pelo Spring 3.4, para um *ESRI-ShapeFile (point)* de pontos, através do *ESRI-ArcView* (função *Add Event Theme*) facilitando a visualização da dispersão dos valores.

3.8 Cálculo da Produtividade Real

A produção real por talhão, com base no método proposto, é dada pela fórmula abaixo.

$$PdR = PdE \left(1 + \frac{CV}{100} \right) \quad (15)$$

Onde:

PdR = Produtividade Real

PdE = Produtividade Estimada pelo método tradicional (visitação em campo)

CV = Coeficiente de Variação da média do valor do NDVI por talhão

(imagem do mês que antecede a colheita)

4 Resultados e discussões

Como resultado do processamento dos dados do ERP Agrícola e da sua integração com dados da imagem e da cartografia dos talhões, foi gerado a tabela de dispersão de valores de NDVI (Tabela 02).

Tabela 02 – Quebra de produtividade(%) e dispersão dos valores de NDVI.

Talhão	Quebra %	CV%	Media	s²	s
1105004	11,13	19,99280856	0,703450980	5,04376	0,140639608
1204004	11,73	9,465973535	0,174258824	0,069383137	0,016495294
1230003	22,82	17,65289115	0,395520392	1,243114902	0,069820784
1236001	21,03	20,51634872	0,236547843	0,600590196	0,04853098
1236005	12,96	15,52029366	0,229048627	0,322253725	0,03554902
1245006	27,02	20,77878226	0,498243922	2,733153725	0,10352902
1414012	21,55	19,47115414	0,636309804	3,914355686	0,123896863
1437005	11,55	11,28386508	0,712487059	1,648201569	0,080396078
1437007	4,4	13,28211223	0,67512	2,050387451	0,089670196
1437012	19,06	14,43382632	0,622399608	2,057992549	0,089836078
1445008	42,86	37,37286417	0,45046	7,227136078	0,168349804
1502005	31,5	21,95798265	0,252444706	0,783529412	0,055431765
1505017	31,4	27,19069528	0,312386275	1,839783137	0,08494
1509012	23,06	21,64055608	0,797888235	7,602582353	0,172667451
1515015	22,02	24,49887762	0,526367451	4,240435294	0,128954118
1603017	35,02	36,10177139	0,26160902	2,274586667	0,09444549
1603018	28,52	34,0799458	0,346156078	3,548792549	0,117969804
1613002	23,5	26,77628018	0,274571373	1,378324706	0,07352
1613004	12,69	13,79889617	0,227372549	0,251018039	0,031374902
1613007	20,75	20,89607452	0,30530549	1,037865882	0,063796863
1613016	33,71	26,65773405	0,218045098	0,861552157	0,058125882
1613018	20,72	15,04545035	0,178345882	0,183602353	0,026832941
1613020	10,14	17,10179969	0,203063137	0,307532549	0,034727451
1635008	14,41	12,96176904	0,203766667	0,177881176	0,026411765
1638003	22,36	15,8659544	0,266037647	0,454317255	0,042209412
1710002	13,24	15,15654912	0,223083529	0,291527059	0,033811765
1710007	12,44	11,52299169	0,197923137	0,132634902	0,022806667
1711001	18,84	18,12069656	0,195921569	0,321405098	0,035502353
1913001	18,5	14,67886317	0,190347059	0,199076863	0,027940784
1913006	18,7	13,40953315	0,281543922	0,363460784	0,037753725
1913011	4,01	8,045482328	0,17130549	0,048438431	0,013782353

Talhão	Quebra %	CV%	Media	s ²	s
1913012	11,35	5,518312162	0,166952157	0,021644706	0,009212941
1913015	8,19	8,960504491	0,181336078	0,067325098	0,016248627
1914004	21,83	25,24471242	0,404035686	2,65288902	0,101997647
1915024	18,59	12,8814399	0,516091373	1,127002353	0,06648
1917001	14,98	13,77199631	0,52105451	1,313103529	0,071759608
1921007	15,37	13,83297148	0,280506275	0,383931373	0,038802353
2102006	19,18	14,37611865	0,343988235	0,623603922	0,049452157
2112001	36,14	33,05707945	0,31452549	2,756646667	0,103972941
2112002	10,07	19,12939968	0,331418824	1,024931765	0,063398431
2116003	24,21	19,3205144	0,359741569	1,231854902	0,069503922
2119001	28,29	26,57405059	0,555049804	5,54777451	0,147499216
2123001	30,46	35,45130911	0,35349451	4,004704314	0,125318431
2123002	32,59	32,73550457	0,481240392	6,328533725	0,157536471
2123003	33,96	30,41682007	0,544279608	6,988947451	0,165552549
2123004	16,93	20,4432839	0,453248235	2,18934	0,092658824
2126002	20,38	18,55372448	0,361561569	1,147534118	0,067083137
2126003	9,1	13,14523802	0,301279608	0,399957255	0,039603922
2126006	25,52	19,04852701	0,370208235	1,268110588	0,070519216
2126007	27,91	20,80361281	0,313047059	1,08152	0,065125098
2129001	20,21	28,77002522	0,22714	1,088944314	0,065348235
2141004	16,13	19,03777482	0,443889412	1,821054118	0,084506667
2141006	17,77	22,24912825	0,443891373	2,487253333	0,098761961
2141017	13,15	20,56286977	0,374774118	1,514427451	0,077064314
2143003	5,41	9,074589554	0,176947451	0,065748235	0,016057255
2205010	29,47	18,19228855	0,278861961	0,65629098	0,050731373
2209008	7,83	15,68363142	0,228956078	0,328803137	0,035908627
2209010	12,43	13,79177194	0,213272941	0,220621569	0,029414118
2214002	17,45	25,34057554	0,299406667	1,467892549	0,075871373
2227008	25,22	29,79575781	0,297090588	1,998150196	0,088520392
2323002	24,42	35,55580334	0,313018039	3,158643529	0,111296078
2323006	49,28	30,97573227	0,321640784	2,531189804	0,099630588
2332001	33,27	24,54367857	0,267785098	1,101517647	0,065724314
2348006	14,37	18,20614664	0,222445882	0,418236078	0,040498824
2348012	13,85	14,69020634	0,212418431	0,248300392	0,031204706
2406004	21,13	21,69044136	0,552490588	3,662077255	0,119837647
2406005	21,4	20,05837433	0,564174902	3,265576863	0,113164314
2406010	27,05	29,68925593	0,682561569	10,47183451	0,202647451
2406015	27,52	17,16183924	0,396481569	1,180630588	0,068043529
2424005	39,44	26,779787	0,430520784	3,389542353	0,115292549
2443001	23,3	21,61700105	0,582404706	4,041858039	0,125898431
2443002	15,72	22,69515177	0,643234902	5,43432549	0,145983137

Talhão	Quebra %	CV%	Media	s ²	s
2443003	13,45	23,11284868	0,653604706	5,819384314	0,151066667
2443005	24,8	36,69747095	0,422231373	6,122275686	0,154948235
2452004	19,59	27,18010936	0,37753098	2,685023137	0,102613333
3139001	29,87	20,00870323	0,242416078	0,59993451	0,048504314
3316001	40,68	36,3920445	0,490808627	8,135378039	0,178615294
3317006	21,81	21,49434301	0,24654549	0,716114118	0,052993333
3402018	24,43	19,05046903	0,186742353	0,322724706	0,035575294
3402020	12,73	13,23975418	0,221238039	0,218788627	0,029291373
3402022	17,38	16,26901009	0,252755294	0,431186275	0,041120784
3402029	13,12	18,02031917	0,197746275	0,323801961	0,03563451
3403001	12,22	16,45380762	0,319091765	0,702915294	0,052502745
3405004	12,37	19,28845903	0,231356471	0,507803137	0,044625098
3405009	10,3	11,03825997	0,189241961	0,111270196	0,02088902
3504003	5,7	4,854052466	0,170837647	0,017535686	0,008292549
3504007	6,4	9,194657322	0,165181176	0,058820784	0,015187843
4102002	17,58	25,05586754	0,616830196	6,091024314	0,154552157
4206003	16,88	22,73730817	0,196451765	0,508779216	0,044667843
4207004	14,17	22,29115826	0,312878824	1,24038902	0,069744314
4402003	39,77	36,79520915	0,275558039	2,621491765	0,101392157
4404006	7,08	7,407078352	0,211869412	0,062800784	0,015693333
4405009	3,38	9,03007418	0,210616471	0,092238431	0,019018824
4406003	10,53	8,139579139	0,206076078	0,071744706	0,016773725
4406005	26,7	35,35237124	0,241595686	1,860174902	0,085409804
4409003	6,5	5,314832161	0,204304314	0,030066275	0,010858431
4415010	25,58	23,85711467	0,304140784	1,342533333	0,072559216
4415014	27,22	15,26559404	0,286195294	0,486737647	0,043689412
4516007	7,2	12,94976415	0,498823529	1,064035686	0,064596471
4517002	6,25	15,01761124	0,374538039	0,806745098	0,056246667
4517005	25,05	23,39658454	0,445861961	2,774898431	0,104316471
4519004	24,3	30,25187211	0,303998039	2,156686667	0,091965098

A quebra percentual média dos talhões estudados foi de 19,86% com desvio padrão de 9,48. A média do Coeficiente de Variação (CV) foi de 20,09% com desvio padrão de 7,99.

A Figura 06 demonstra graficamente a distribuição dos valores da tabela 02, facilitando a visualização da correlação entre o CV da média do NDVI por talhão e o valor da quebra de produtividade real.

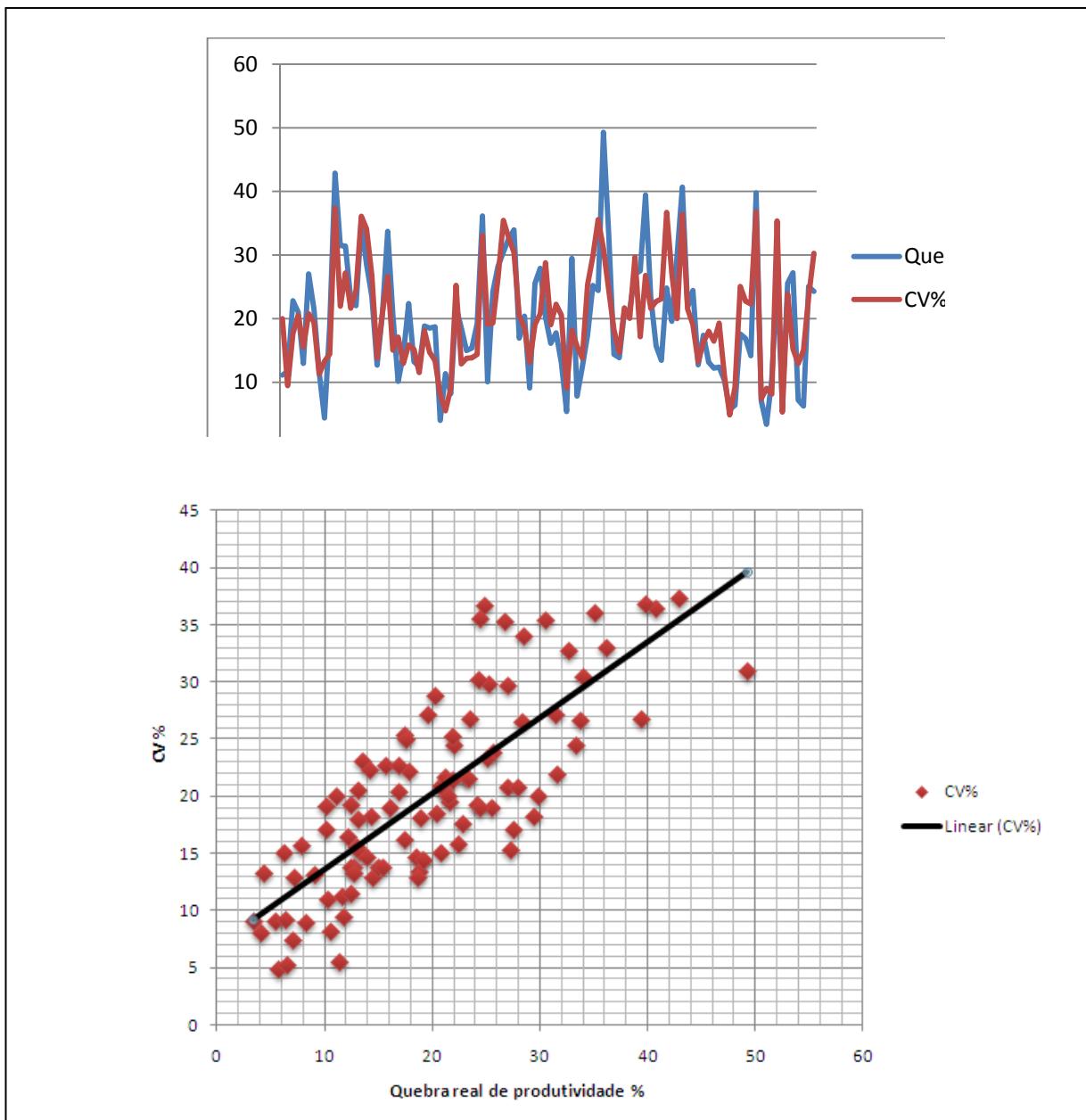


Figura 06 – Distribuição dos valore de CV e Quebra de Produtividade Real (%).

Para a determinação do CV com maior Coeficiente de Correção com a quebra real de produtividade, foram calculados os CV da Média, da Moda, da Mediana e da Amplitude (Tabela 03).

Tabela 03 – Coeficientes de Variação de parâmetros estatísticos da dispersão do valor do NDVI dos talhões.

Talhão	Moda	Mediana	Amplitude	CVmoda	CVmediana	CVamplitude
1105004	0,745098039	0,745098	0,56078431	18,87531579	18,87531579	79,71903174
1204004	0,156862745	0,172549	0,0627451	10,51575	9,559772727	36,00684233
1230003	0,447058824	0,403922	0,3254902	15,61780702	17,28572816	82,29416399
1236001	0,235294118	0,227451	0,3254902	20,62566667	21,33689655	137,6001556
1236005	0,211764706	0,219608	0,16470588	16,78703704	16,1875	71,90869562
1245006	0,51372549	0,513725	0,55686275	20,15259542	20,15259542	111,7650864
1414012	0,584313725	0,631373	0,62745098	21,2038255	19,62341615	98,60778131
1437005	0,678431373	0,701961	0,31764706	11,85028902	11,45307263	44,58285326
1437007	0,721568627	0,678431	0,42745098	12,42711957	13,21728324	63,31481514
1437012	0,678431373	0,654902	0,37254902	13,2417341	13,71748503	59,85688539
1445008	0,388235294	0,388235	0,60784314	43,36282828	43,36282828	134,9383164
1502005	0,298039216	0,254902	0,23529412	18,59881579	21,74630769	93,20620097
1505017	0,309803922	0,309804	0,33333333	27,41734177	27,41734177	106,7054979
1509012	0,466666667	0,870588	0,49411765	37,00016807	19,83342342	61,92817845
1515015	0,607843137	0,537255	0,70980392	21,21503226	24,00240876	134,8495084
1603017	0,211764706	0,227451	0,65490196	44,59925926	41,52344828	250,3361543
1603018	0,28627451	0,298039	0,49411765	41,20863014	39,58197368	142,7441785
1613002	0,243137255	0,254902	0,6	30,23806452	28,84246154	218,5224168
1613004	0,22745098	0,219608	0,17254902	13,79413793	14,28678571	75,8882375
1613007	0,28627451	0,298039	0,36078431	22,28520548	21,40552632	118,1715763
1613016	0,184313725	0,2	0,52941176	31,53638298	29,06294118	242,7992029
1613018	0,160784314	0,168627	0,14901961	16,68878049	15,91255814	83,55651856
1613020	0,211764706	0,2	0,14509804	16,39907407	17,36372549	71,45464319
1635008	0,188235294	0,2	0,14901961	14,03125	13,20588235	73,13247657
1638003	0,254901961	0,254902	0,17254902	16,55907692	16,55907692	64,85887315
1710002	0,211764706	0,219608	0,41568627	15,96666667	15,39642857	186,3366031
1710007	0,188235294	0,196078	0,13333333	12,11604167	11,6314	67,36621702
1711001	0,180392157	0,184314	0,18431373	19,68065217	19,26191489	94,07526233
1913001	0,184313725	0,184314	0,10980392	15,1593617	15,1593617	57,68616577
1913011	0,160784314	0,27451	0,14901961	23,48097561	13,75314286	112,8232703

Talhão	Moda	Mediana	Amplitude	CVmoda	CVmediana	CVamplitude
1913012	0,17254902	0,168627	0,09411765	7,9875	8,173255814	86,99056288
1913015	0,17254902	0,168627	0,05098039	5,339318182	5,463488372	56,37402457
1914004	0,447058824	0,176471	0,08627451	3,634561404	9,207555556	28,11376013
1915024	0,51372549	0,403922	0,76078431	19,85450382	25,25184466	21,35319057
1917001	0,537254902	0,513725	0,38039216	12,3740146	12,94076336	147,412716
1921007	0,274509804	0,537255	0,40392157	26,141	13,35671533	73,00429278
2102006	0,352941176	0,27451	0,34901961	10,994	14,13514286	143,9973384
2112001	0,423529412	0,352941	0,24705882	11,6762037	14,01144444	101,462659
2112002	0,352941176	0,321569	0,37647059	29,459	32,33304878	78,5496972
2116003	0,368627451	0,337255	0,29411765	17,19851064	18,79837209	113,5936051
2119001	0,51372549	0,368627	0,32941176	13,52938931	18,85478723	81,75803837
2123001	0,262745098	0,537255	0,68627451	56,13776119	27,45423358	59,34814455
2123002	0,631372549	0,309804	0,57254902	19,84857143	40,45088608	194,1400759
2123003	0,490196078	0,490196	0,55686275	32,13744	32,13744	118,9736002
2123004	0,447058824	0,537255	0,63529412	37,03149123	30,81452555	102,3118893
2126002	0,403921569	0,447059	0,41176471	22,93980583	20,72631579	140,1647201
2126003	0,28627451	0,368627	0,38431373	23,43315068	18,19808511	113,8850877
2126006	0,403921569	0,298039	0,23529412	9,804854369	13,28815789	127,5604853
2126007	0,321568627	0,368627	0,32941176	21,9297561	19,13021277	63,55723557
2129001	0,211764706	0,309804	0,35686275	30,75351852	21,02139241	105,227553
2141004	0,423529412	0,207843	0,25882353	15,42944444	31,44113208	157,111363
2141006	0,537254902	0,447059	0,65882353	15,72934307	18,90280702	58,30811076
2141017	0,423529412	0,423529	0,49019608	23,3187963	23,3187963	148,4199897
2143003	0,160784314	0,388235	0,42352941	47,9302439	19,84989899	130,7977409
2205010	0,309803922	0,172549	0,07058824	5,183037975	9,305909091	239,3532134
2209008	0,243137255	0,27451	0,25882353	20,86532258	18,48071429	25,31296838
2209010	0,211764706	0,235294	0,16862745	16,95685185	15,26116667	113,0450575
2214002	0,254901961	0,211765	0,22745098	11,53938462	13,89	79,06650005
2227008	0,274509804	0,286275	0,35294118	27,63885714	26,5030137	75,96723957
2323002	0,243137255	0,286275	0,56470588	36,40758065	30,92150685	118,7991792
2323006	0,22745098	0,262745	0,48235294	48,93189655	42,35895522	180,4068167
2332001	0,28627451	0,309804	0,47058824	34,80246575	32,15924051	149,9663488

Talhão	Moda	Mediana	Amplitude	CVmoda	CVmediana	CVamplitude
2348006	0,211764706	0,254902	0,28627451	31,03648148	25,78415385	175,7335429
2348012	0,211764706	0,219608	0,18431373	19,12444444	18,44142857	128,694003
2406004	0,607843137	0,211765	0,16470588	5,133677419	14,73555556	86,76917965
2406005	0,607843137	0,584314	0,54509804	19,71522581	20,50912752	29,81152685
2406010	0,537254902	0,584314	0,50980392	21,06343066	19,36704698	96,61862626
2406015	0,403921569	0,654902	0,65098039	50,17	30,94317365	74,68980721
2424005	0,352941176	0,403922	0,28235294	19,279	16,84572816	164,1893195
2443001	0,584313725	0,423529	0,49019608	19,73127517	27,22185185	65,58404391
2443002	0,537254902	0,584314	0,62352941	23,43364964	21,54637584	84,16760286
2443003	0,721568627	0,631373	0,61960784	20,2313587	23,1215528	96,93650143
2443005	0,584313725	0,701961	0,59215686	25,85369128	21,52067039	94,79855856
2452004	0,403921569	0,447059	0,57254902	38,36097087	34,65947368	140,2446379
3139001	0,235294118	0,388235	0,41176471	43,61066667	26,43070707	151,6561687
3316001	0,368627451	0,243137	0,19607843	13,15808511	19,94935484	169,8586634
3317006	0,28627451	0,423529	0,70980392	62,3930137	42,17305556	39,95007814
3402018	0,160784314	0,254902	0,22745098	32,95926829	20,78969231	287,8997787
3402020	0,2	0,172549	0,23921569	17,78764706	20,6175	121,7993542
3402022	0,262745098	0,219608	0,12156863	11,14820896	13,33803571	108,1259313
3402029	0,196078431	0,24902	0,17647059	20,9716	16,51307087	48,0973625
3403001	0,309803922	0,188235	0,20392157	11,50227848	18,93083333	89,24091743
3405004	0,2	0,309804	0,25098039	26,25137255	16,94708861	63,90687331
3405009	0,188235294	0,219608	0,21568627	23,70708333	20,32035714	108,4821137
3504003	0,160784314	0,188235	0,13333333	12,99195122	11,09729167	113,9738084
3504007	0,149019608	0,168627	0,04313725	5,564736842	4,917674419	78,0468078
4102002	0,701960784	0,164706	0,11372549	2,163631285	9,221190476	26,11511254
4206003	0,176470588	0,654902	0,63529412	87,57955556	23,59928144	18,43708216
4207004	0,352941176	0,176471	0,19607843	12,65588889	25,31177778	323,3842771
4402003	0,235294118	0,321569	0,28627451	29,64133333	21,68878049	62,66912778
4404006	0,211764706	0,243137	0,68627451	47,87962963	41,7016129	103,8890068
4405009	0,219607843	0,211765	0,08235294	7,146071429	7,410740741	323,9139164
4406003	0,211764706	0,211765	0,09411765	8,981111111	8,981111111	39,10090204
4406005	0,2	0,207843	0,07843137	8,386862745	8,070377358	45,67131271

Talhão	Moda	Mediana	Amplitude	CVmoda	CVmediana	CVamplitude
4409003	0,2	0,207843	0,49803922	42,70490196	41,09339623	32,46389507
4415010	0,274509804	0,2	0,066666667	3,955571429	5,429215686	243,7732274
4415014	0,321568627	0,286275	0,6	22,56414634	25,3460274	21,91967454
4516007	0,51372549	0,27451	0,28235294	8,504427481	15,91542857	209,6470531
4517002	0,403921569	0,513725	0,42352941	15,9923301	12,57412214	56,6037734
4517005	0,537254902	0,368627	0,23529412	10,46927007	15,25840426	113,0804794
4519004	0,368627451	0,466667	0,34509804	28,29861702	22,35352941	52,77286259
1913006	0,309803922	0,337255	0,31764706	29,68493671	27,26872093	113,5198244

A distribuição dos CV estudados é representada nas Figuras 07, 08 e 09.

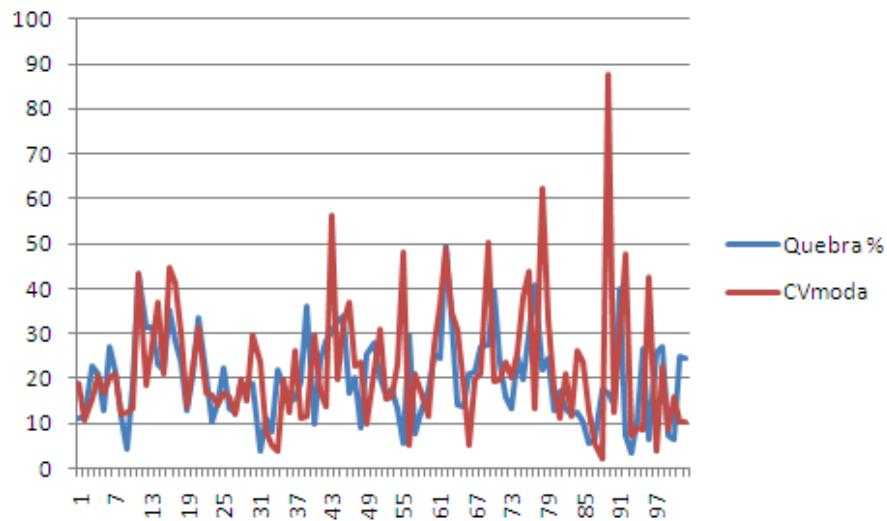


Figura 07 – Distribuição do CV da moda em relação à Quebra %.

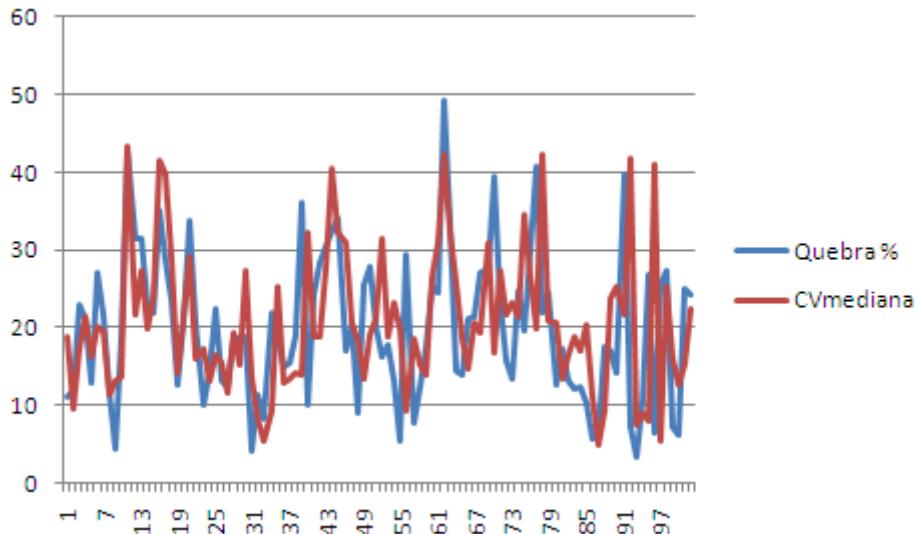


Figura 08 – Distribuição do CV da mediana em relação à Quebra %.

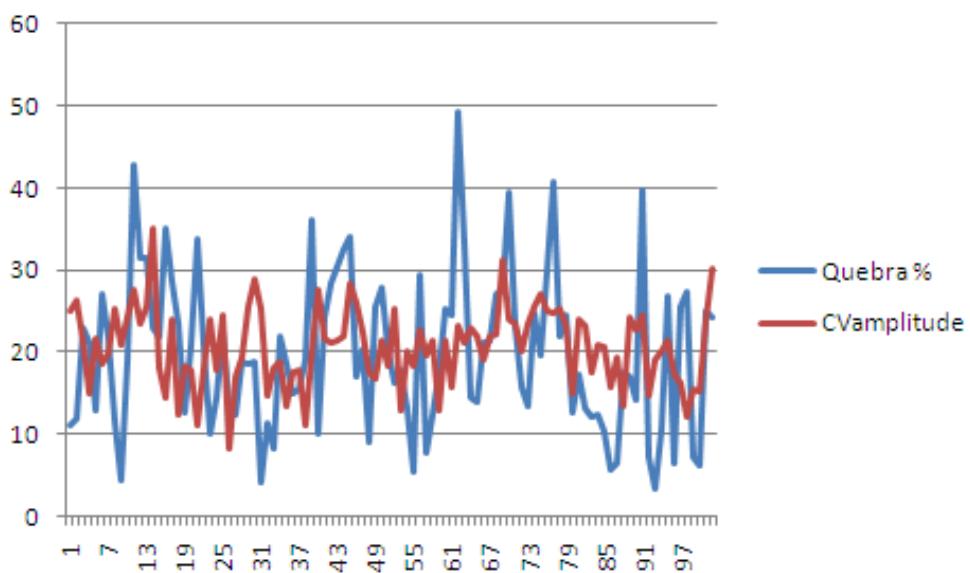


Figura 09 – Distribuição do CV da mediana em relação à Quebra %.

A comparação entre os CV, realizada pelo cálculo do Coeficiente de Correlação, encontra-se na Tabela 04.

Tabela 04 – Coeficientes de Correlação entre o percentual de quebra de produtividade e a dispersão do valor do NDVI representado pelo Coeficiente de Variação.

Coeficiente de Variação (%) do NDVI	Coeficiente de Correlação
CV da média	0,785496096
CV da moda	0,564944787
CV da mediana	0,777870525
CV da amplitude	0,113581848

A estimativa de produtividade realizada pela usina, ainda que seja oriunda de observações e amostragem realizada por técnicos capacitados, está sujeita a erros grosseiros, fato que parece não ter acontecido na amostra utilizada neste estudo, uma vez que a média da estimativa original foi de 19,86%. Na prática os erros de estimativa de produtividade chegam a 40%, principalmente em talhões de difícil acesso onde o

processo de amostragem é precário e a observação de campo fica restrita às bordas do talhão.

Ocorrências como o “*efeito das bordas*” (Figura 10) podem acrescentar erros à estimativa da quebra e consequentemente alterar o resultado da correlação estudada. O efeito das bordas é causado pela diferença de ambiente entre as fileiras de cana plantadas nas bordas do talhão e as fileiras do seu interior. Nas bordas as condições ambientais são alteradas por diferenças de insolação, pisoteio, restos de adubos e defensivo, ventos, sombreamento, etc., alterando o desenvolvimento das plantas.

Para minimizar este tipo de erro é recomendável a adoção de práticas de amostragem adequadas, retirando amostras do interior dos talhões, evitando-se a inspeção visual que pode ser comprometida pelo referido efeito, como no exemplo mostrado na Figura 07.

Outra possível fonte de erros do método proposto é a qualidade do georreferenciamento dos talhões. A perfeita compatibilização entre os polígonos que representam os talhões e suas feições na imagem, resulta na seleção correta dos pixels pertencentes ao talhão. Esta vinculação é base para a transferência dos dados entre as tabelas, necessária aos cálculos das variáveis.

Imprecisões no georreferenciamento dos talhões permitirão que pixels de fora do talhão sejam processados, comprometendo o resultado do trabalho.

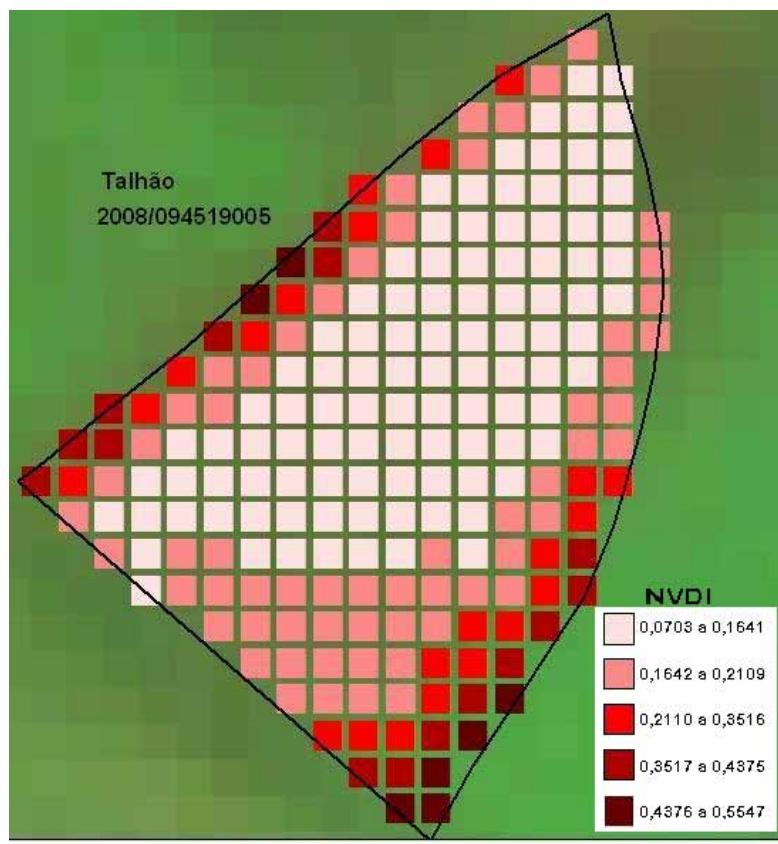


Figura 10 – Efeito das bordas registrado no valor do NDVI.

Usina Cruz Alta - Talhão 4519005 da safra 2008-2009. Imagem CBERS outubro 2008.

5 Conclusões

O estudo do Coeficiente de Variação dos valores de NDVI vinculados a cada talhão, mostrou-se eficiente para a estimativa de quebras de produtividade, apresentando um Coeficiente de Correlação de 0,7855. Este resultado, leva portanto o CV a ser uma ferramenta complementar aos gestores, em que pese decidir com um erro em torno de 20%, pela técnica do CV, a poder errar em até 40% com a estimativa tradicional de visitação aos talhões.

As imagens de média resolução do CBERS se mostraram adequadas ao processo proposto, no entanto outros satélites devem ser pesquisados com o objetivo de garantir a disponibilidade de imagens no momento adequado, ou seja, no período que antecede o processo de colheita, viabilizando o uso da informação para o ajuste do plano de moagem.

Na prática o método pode ser utilizado para ajustar as estimativas de produtividade antes do início da colheita, reduzindo assim os transtornos operacionais causadas pelas quebras inesperadas no volume colhido.

O método testado pode também ser empregado para a identificação de anormalidades dentro dos talhões, principalmente em regiões de difícil acesso e em talhões onde a inspeção visual não consegue obter informações do interior do talhão por conta do desenvolvimento das plantas.

A dispersão do NDVI pode identificar a falta de homogeneidade dentro dos talhões facilitando o planejamento das visitas de campo e consequentes intervenções para a correção dos problemas.

A simplicidade do método testado pode facilitar a sua aplicação nas usinas, podendo ser utilizadas imagens de baixo custo, como as do satélite LANDSAT.

6 Referencias bibliográficas

AGUIAR, A. DANIEL. Análise espacial da colheita de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. São José dos Campos: INPE, 2007. Monografia

http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/trabalhos/Daniel_Wagner_Monografia.pdf

BUENO, Célia R. P.. Remote sensing analysis of land cover with sugarcane applied to the environmental studies in northwest of São Paulo state, Brazil. USP-Jaboticabal-SP. 2008.

CENTENO, J.A.S. Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais. Curitiba: Ed. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2004, 219 p.

GOMES, FREDERICO PIMENTEL. Curso de estatística experimental. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1981. 430p.

JOHNSTON, Kevin M.; KOPP, Steve. Introduction to Grid. Workshop Proceedings of the eleventh annual ESRI user conference. ESRI-Envinmental Systems Research Institute. Redlandas,CA. USA, 1991, 478 p.

Jornal da Cana. Série 2, no 204. Ribeirão Preto-SP, Dezembro 2010.
www.jornalcana.com.br. Acessado em 16/12/2010.

LATORRE, LOPES MARCELO. Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor aviris em regiões tropicais. São José dos Campos: INPE, 1998. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, 1998.

MACHADO, Hermógenes Moura. Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM + / Hermógenes Moura Machado. Campinas, SP: [s.n.], 2003.

MEYER, PAUL L. Probabilidade. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 3º edição, Rio de Janeiro, 1995, 153 p.

MOREIRA, R.C. Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação. São José dos Campos: INPE, 2000. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, 2000, 181 p.

NOVO, EVLYN M.L. DE MORAES. Sensoriamento remoto – Princípios e aplicações. Editora Edgard Blucher Ltda. 2ª edição, São Paulo, 1995, 308 p.

PICOLI, M. C. A. Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva / Michelle Cristina Araujo Picoli. – São José dos Campos: INPE, 2006. 90p. ; (INPE-14669-TDI/1222)

PONTES, Pedro Piason Breglio. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. UNICAMP/FEAGRI. Campinas - SP, Brasil. 2005.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed., 2009.

RAFAELLI, D.R. Detecção de geada em lavouras de café. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 145-151.

RAMME, Fernando L. P.; LAMPARELLI, Rubens A. C. and ROCHA, Jansle V.. Perfilis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. Eng. Agríc. [online]. 2010, vol.30, n.3, pp. 480-494. ISSN 0100-6916.

REIS, Lais N. G.. Mapeamento das áreas ocupadas com cana-de-açúcar no município de Canápolis-MG por meio de imagens LANDSAT/TM-5. UFU-Uberlândia-MG, 2009.

RUDORFF, Bernardo F.T. Dados Landsat na Estimativa da Produtividade Agrícola da Cana-de-Açúcar. São José dos Campos: INPE, 1985. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações, 1985, 115 p.

RUDORFF, Bernardo F.T. O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. Editora Parêntese, São José dos Campos-SP, 2007. 423 p.

SEGATO, Silvelena V.; PINTO, Alexandre de Sene; Jendiroba, Eloisa; NÓBREGA, José C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Editora CP 2, Piracicaba – 2006. 414 p.

SILVA, V. R. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.27 no.6 Viçosa Nov./Dec. 2003

ZULLO JR., JURANDIR. Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

APÊNDICE I
EXEMPLO DOS DADOS ORIGINAIS EXTRAÍDOS DA IMAGENS (POR PIXEL)

"GEOCOD";"NORTE";"LESTE";"ND";"VARIANC";"MEDIA";"S";"PARCELAS";"NDVI_VAL";"SOMA";"QUEBRAPER";"CV"
"2008/091917001";7739744,46;728455,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739724,46;728455,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739724,46;728475,78;108,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,15;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739724,46;728495,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739724,46;728515,78;143,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,11;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728455,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728475,78;103,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,19;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728495,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728515,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728535,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728555,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728575,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739704,46;728595,78;149,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,16;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728455,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728475,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728495,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728515,78;143,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,11;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728535,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728555,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728575,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728595,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728615,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728635,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728655,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739684,46;728675,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728455,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728475,78;143,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,11;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728495,78;149,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,16;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728515,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728535,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728555,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728575,78;114,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,10;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728595,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,16;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728615,78;143,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,11;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728635,78;149,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728655,78;119,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728675,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728695,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728715,78;125,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739664,46;728735,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739644,46;728455,78;131,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,02;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739644,46;728475,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;0,07;79057,00;-14,98;13,77
"2008/091917001";7739644,46;728495,78;137,00;334,84;132,86;18,29;595,00;-0,07;79057,00;-14,98;13,77

APÊNDICE II
ROTINA EM VB PARA CÁLCULO DO CV

```
Private Sub CmdCalculaCV_Click()
On Error GoTo Fechar:
' Calcula soma,media,variancia e desvio padrao por talhao
Dim mSoma As Double, mSomaDesvios As Double, mConta As Integer, mVariancia As
Double, mDesvioPadrao As Double, mMedia As Double, mQuebraVal As Double
Dim mSQL As String, mQuebra As String
Dim mOrdem As Integer, i As Integer
Dim mCV As Double
'Abre arquivo de saida
Open "c:\NDVI08Var.txt" For Output As #1
Print #1, "Talhao ; Quebra ; Soma ; Parcelas ; Media ; Variancia ; Desvio Padrao ; CV"
'Abre arquivo de pixels
Set CN = New ADODB.Connection
Set CN = CreateObject("ADODB.Connection")
CN.Mode = adModeReadWrite
CN.Open      ("Provider=vfpoledb.1;Data      Source=D:\02_Mestrado\Mestrado
2009\07_Aplicativo\Geobase2008-09\amostra2.dbf;Mode = Share Deny None")
Set Rs = New ADODB.Recordset
mSQL = "Select geocod,ndvi_val,quebraper from amostra2.dbf order by geocod"
Rs.Open mSQL, CN, adOpenStatic, adLockReadOnly
mQuebra = ""
Do While Not Rs.EOF
    mConta = 0
    mSoma = 0
    mSomaDesvios = 0
    mVariancia = 0
    mDesvioPadrao = 0
    mQuebra = Rs("Geocod")
    mQuebraVal = Val(Replace(Rs("quebraper"), ",", "."))
    ' calcula a media
    Do While mQuebra = Rs("Geocod") And Not Rs.EOF
```

```

mConta = mConta + 1
mSoma = mSoma + Val(Replace(Rs("ndvi_val"), ",", "."))
Rs.MoveNext

Loop
mMedia = mSoma / mConta
' calcula a soma dos desvios
For i = 1 To mConta
    Rs.MovePrevious
Next i

Do While mQuebra = Rs("Geocod") And Not Rs.EOF
    mSomaDesvios = mSomaDesvios + ((Val(Replace(Rs("ndvi_val"), ",", ".")) - mMedia)) ^ 2
    Rs.MoveNext

Loop
' Calcula a variância
mVariância = mSomaDesvios / (mConta - 1)
mDesvioPadrao = Sqr(mVariância)
mCV = 100 * (mDesvioPadrao / mMedia)
mSQL = mQuebra & ";" & mQuebraVal & ";" & Replace(mSoma & ";" & mConta & ";" & mMedia & ";" & Format(mVariância, "#0.#####") & ";" & Format(mDesvioPadrao, "#0.#####") & ";" & Format(mCV, "#0.#####"), ",", ".")
' MsgBox mSQL
Print #1, mSQL

Loop
Fchar:
Close #1
CN.Close
MsgBox "FIM"
Exit Sub

```

APÊNDICE III
EXEMPLO DOS DADOS ORIGINAIS DE QUEBRA POR TALHÃO

AREA_TL: Área do talhão (ha)

AREA_MOA: Área de moagem (ha)

AREA_COL: Área de colheita

DT_FECHADO: Data de fechamento do talhão

PD_OUT: Estimativa de produtividade calculada em outubro 2008 (t/ha)

PD_REAL: Produção obtida na colheita (t/ha)

BLOCO	TALHAO	AREA_TL	AREA_MOA	AREA_COL	DT_FECHADO	PD_OUT	PD_REAL
3203	008	9,03	9,03	9,03	25/04/2008	60	79,3850
3203	011	9,47	9,47	9,47	25/04/2008	75	78,5550
3203	012	13,58	13,58	13,58	25/04/2008	70	107,5330
3203	009	4,74	4,74	4,74	25/04/2008	70	20,9040
3401	004	11,53	11,53	11,53	09/05/2008	60	68,9880
3401	003	10,7	10,7	10,7	09/05/2008	60	79,7480
3401	016	10,69	10,69	10,69	26/04/2008	55	66,2670
3401	014	9,59	9,59	9,59	27/04/2008	55	28,0560
3401	011	0,9	0,9	0,9	28/04/2008	60	4,9530
3401	018	9,46	9,46	9,46	26/04/2008	55	18,8050
3401	012	11,25	11,25	11,25	28/04/2008	55	70,3340
3401	006	7,06	7,06	7,06	30/04/2008	60	42,2570
3401	015	8,42	8,42	8,42	26/04/2008	55	58,1820
3401	005	11,54	11,54	11,54	28/04/2008	60	15,4110
3401	007	6,08	6,08	6,08	10/05/2008	58	26,7250
3401	013	9,85	9,85	9,85	28/04/2008	55	57,5430
4516	001	10,27	10,27	10,27	14/12/2008	40	42,4760
4516	007	13,7	13,7	13,7	11/11/2008	60	76,2830
4516	005	9,42	9,42	9,42	15/12/2008	50	32,3950
4516	002	9,96	9,96	9,96	14/12/2008	40	54,0800
4516	008	7,53	7,53	7,53	11/11/2008	60	44,4500
4516	003	1,41	1,41	1,41	15/12/2008	50	7,9060
4516	004	9,01	9,01	9,01	15/12/2008	50	37,9170
4516	006	3,19	3,19	3,19	15/12/2008	60	6,0950
1416	015	5,17	5,17	5,17	03/05/2008	81	45,8650
1416	003	7,7	7,7	7,7	13/04/2008	81	85,6710
1416	014	9,38	9,38	9,38	03/05/2008	81	84,1770
1416	013	11,51	11,51	11,51	27/04/2008	81	82,6480
1416	004	7,22	7,22	7,22	13/04/2008	81	74,3220
1416	005	11,98	11,98	11,98	14/04/2008	81	139,9090
4228	004	2,14	2,14	2,14	11/12/2008	75	36,1100
4228	005	1,53	1,53	1,53	10/12/2008	75	31,0580
4228	002	6,6	6,6	6,6	31/08/2008	75	51,3320
4228	007	6,29	6,29	6,29	14/12/2008	75	43,6630
4228	003	8,49	8,49	8,49	31/08/2008	75	80,0650
4228	001	4,37	4,37	4,37	30/08/2008	75	42,6450
4228	006	8,08	8,08	8,08	13/12/2008	75	58,9480
1227	006	3,93	3,93	3,93	15/10/2008	115	43,1430
1227	003	0,18	0,18	0,18	16/10/2008	115	8,7280
1227	005	2,12	2,12	2,12	16/10/2008	115	20,6940
1227	002	12,5	12,5	12,5	16/10/2008	115	73,8420
4532	004	0,37	0,37	0,37	05/11/2008	90	2,2350
4532	005	3,3	3,3	3,3	15/11/2008	95	53,3750
4532	002	7,78	7,78	7,78	07/11/2008	75	88,3640
4532	001	4,64	4,64	4,64	08/11/2008	75	56,5240
304006	014	4,6	4,6	4,6	29/11/2008	70	34,3040