



Integração de Ferramentas de SIG e Mineração de Dados para Utilização em Atividades de Gestão Espacialmente Diferenciada Aplicada na Agricultura de Precisão

Eduardo Antonio Speranza¹, Ricardo Rodrigues Ciferri²

¹Embrapa Informática Agropecuária
Campinas, São Paulo, Brasil
eduardo.speranza@embrapa.br

²Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos
São Carlos, São Paulo, Brasil
ricardo@dc.ufscar.br

RESUMO

A agricultura de precisão é uma abordagem agrícola que se utiliza de tecnologias da informação e comunicação para possibilitar uma gestão diferenciada da lavoura voltada para o aumento da produtividade de maneira sustentável, reduzindo os impactos ao meio ambiente a partir da aplicação espacialmente diferenciada de insumos agrícolas e consequentemente proporcionando o aumento do retorno econômico. Um dos conceitos utilizados por essa abordagem é o delineamento de unidades de gestão diferenciada, permitindo tratamentos localizados de acordo com as características do solo e das plantas. Devido ao crescimento da disponibilidade de ferramentas computacionais que podem auxiliar usuários finais, a criação de modelos e arquiteturas acessíveis e capazes de agregar essas ferramentas, de forma a possibilitar o seu uso de maneira integrada, tem se tornado intenso objeto de estudo. Este artigo descreve a proposta de uma arquitetura voltada para apoiar o processo de delineamento de unidades de gestão diferenciada em agricultura de precisão utilizando *software* livre e de distribuição gratuita. A arquitetura proposta é comparada com outras abordagens disponíveis na literatura, onde são identificadas as suas vantagens e desvantagens e propostas novas alternativas para trabalhos futuros. O trabalho realizado nesse artigo permitiu verificar que a solução proposta é viável para essa aplicação de AP, devido à disponibilidade das ferramentas e a utilização dos padrões OGC, amplamente disseminados nas áreas de aplicação que utilizam dados geoespaciais.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de Precisão, Unidades de Gestão Diferenciada, Zonas de Manejo, Sistemas de Informações Geográficas, Mineração de Dados, Dados Espaciais.

ABSTRACT

Precision agriculture is an agricultural approach which uses information and communication technologies to enable differentiated crop management to increase yield in a sustainable way, reducing impacts to the environment from spatially differentiated application of agricultural inputs and consequently providing the increase of profits. One of the concepts used by this approach is the delineation of differentiated management units, allowing site-specific treatments according to soil and plant features. Due to the increasing availability of computational tools which can help end users to apply this concept, the proposal of models and architectures accessible and able to aggregate these tools, so they can be used in an integrated way. This paper describes the proposal of an architecture aimed to support the delineation of differentiated management units in precision agriculture, using free available software. The proposed architecture is compared with other approaches available in the literature, where its advantages and drawbacks are identified and new alternatives are proposed for future work. The work performed in this article allowed to verify that the proposed solution is feasible for this AP application, due to the availability of tools and the use of OGC standards, widely disseminated in applied areas using geospatial data.

KEYWORDS: Precision Agriculture, Differentiated Management Units, Management Zones, Geographic Information Systems, Data Mining, Spatial Data.

INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão (AP) é definida como uma abordagem de gerenciamento agrícola baseada na variabilidade espacial e temporal da lavoura, com o intuito de aumentar a produtividade de maneira sustentável, reduzindo os impactos ao meio ambiente com a aplicação espacialmente diferenciada de insumos agrícolas e, conseqüentemente, aumentando o retorno econômico (BERNARDI et al., 2014; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). Para atingir esse objetivos, essa abordagem comumente utiliza tecnologias de informação e comunicação (TICs) associadas a processos que visam a otimização das culturas (MOLIN, 2003; MASSRUHÁ et al., 2014). Assim, os processos de preparação do solo, plantio, acompanhamento da lavoura e colheita passam a ser auxiliados por atividades de coleta e interpretação de dados, visando a realização de intervenções sítio específicas (COMPARETTI, 2011). Um dos principais fatores contribuintes para impulsionar a adoção da AP no mundo foi a operacionalização do sinal de GPS¹, em meados da década de 90. Desse modo, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (BURROUGH, 1986; CIFERRI, 1995), em conjunto com bancos de dados espaciais (CASANOVA et al., 2005; CIFERRI, 1995), se tornaram ferramentas computacionais essenciais para dar suporte às atividades de armazenamento, manipulação, análise e recuperação de dados georreferenciados que podem ser executadas em um ciclo produtivo utilizando AP.

Nos últimos anos, com o crescimento das TICs e, conseqüentemente, das formas de se

¹GPS: do inglês *Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global.

obter dados georreferenciados em campo, seja por meio de sensores específicos, imagens aéreas e de satélite com altíssima resolução espacial, ou a partir de ferramentas de inspeção instaladas em *tablets* ou *smartphones*, novos conceitos relacionados ao armazenamento, manipulação e recuperação de dados, como *big data* e computação em nuvem, passaram a fazer parte do contexto das pesquisas em AP (LI; CHUNG, 2015). Desse modo, as atividades de análise, que estão fortemente relacionadas ao suporte à decisão para o usuário final, devem ser realizadas com o auxílio de processos de descoberta de conhecimento em bancos de dados (KDD²) (FAYYAD; PIATETSKY-SHAPIO; SMYTH, 1996; WEISS; INDURKHYA, 1998). Uma das atividades de AP que pode se beneficiar desse processo é o delineamento de unidades de gestão diferenciada (UGDs), também conhecidas como zonas de manejo. As UGDs são regiões geográficas delimitadas na lavoura com variabilidade interna desprezível, a ponto de poderem ser consideradas intervenções homogêneas dentro dos seus limites (RUSS, 2012; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). As UGDs obtidas devem ser consistentes ao longo do tempo e caracterizarem o potencial de resposta de uma área de produção agrícola, podendo ser obtidas a partir de tarefas de mineração de dados. Desse modo, as UGDs podem ser utilizadas para diversos fins gerenciais, que vão desde a determinação da densidade apropriada para coleta de amostras em solo, até o direcionamento de investimentos em insumos agrícolas.

Este artigo descreve a proposta de uma arquitetura computacional para suporte à tarefa de delineamento de UGDs em AP, utilizando a integração de SIGs e bancos de dados espaciais com algoritmos capazes de realizar as etapas de KDD necessárias para a execução dessa tarefa, tais como interpolação espacial, agrupamento de dados espaciais e validação. O restante do artigo é organizado da seguinte forma: a seção Material e Métodos descreve as TICs e conceitos utilizados para a construção da arquitetura; a seção Resultados e Discussão descreve a arquitetura em si, bem como resultados que podem ser obtidos com a sua utilização, discussões e comparações com outras soluções disponíveis na literatura; e a seção Conclusões resume os resultados obtidos e indica trabalhos futuros que podem ser realizados com o decorrer desta pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os conceitos sobre TICs que dão suporte ao desenvolvimento da arquitetura proposta neste artigo, partindo desde o armazenamento dos dados até a interface com o usuário final. Também são descritos os dados reais utilizados em experimentos realizados com uma implementação da arquitetura proposta.

Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Espaciais (SGBDEs)

Os Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBDs) são programas de computador que auxiliam nos processos de definição, construção, carga, manipulação e compartilhamento de

²KDD: do inglês *Knowledge Discovery in Databases*.

bancos de dados entre diversos usuários e aplicações (ELMASRI; NAVATHE, 2011). Dentre os SGBDs mais conhecidos e utilizados atualmente, destacam-se o PostgreSQL (POSTGRESQL, 2017) e o Oracle (ORACLE, 2017), que, dentre outras características, possuem mecanismos de extensibilidade que possibilitam o desenvolvimento de extensões geográficas capazes de tratar dados espaciais, que também são conhecidos como dados georreferenciados, dados geoespaciais ou dados geográficos (CASANOVA et al., 2005; CIFERRI, 1995), tornando-os SGBDs Espaciais (SGBDEs). Para as atividades de AP, pode ser utilizado qualquer SGBDE que possua a característica de armazenar dados espaciais, utilizando objetos bidimensionais para representar a disposição espacial; e dados convencionais associados a esse objetos representando fenômenos naturais que ocorrem na lavoura.

Padrões Open Geospatial Consortium

A OGC (*Open Geospatial Consortium*) é uma organização internacional sem fins lucrativos criada para o desenvolvimento de padrões de consenso para dados geoespaciais. Os padrões OGC são baseados na gramática de modelagem GML (*Geography Markup Language*), que atua no transporte, armazenamento e intercâmbio de dados geoespaciais na *Web* (PERCIVALL et al., 2003). Dentre esses padrões, destacam-se três importantes serviços: WMS (*Web Map Service*), utilizado para a recuperação e visualização de mapas como imagens; WFS (*Web Feature Service*), utilizado para acesso e edição de dados geoespaciais; e o WPS (*Web Processing Service*), utilizado para a execução de algoritmos de geoprocessamento. Diversos módulos da arquitetura proposta neste artigo são integrados utilizando os padrões OGC, que vêm sendo amplamente disseminados na comunidade produtora de dados geoespaciais.

Servidores de Mapas

A disponibilização dos SIGs na *Web* impulsionou o desenvolvimento de soluções para disseminar informações espaciais em forma de mapa, permitindo a criação de aplicações interativas com diversas funcionalidades disponíveis para o usuário final (MITCHELL, 2005). Desse modo, surgiram os servidores de mapas, como o GeoServer (GEOSERVER, 2017), capazes de acessar, manipular e entregar dados geoespaciais seguindo os padrões OGC. *Software* livre e de distribuição gratuita, o GeoServer possui suporte a diversos serviços OGC, e compatibilidade para manipular dados especiais armazenados por diversos SGBDEs, podendo ser facilmente integrado aos SIGs.

Sistemas de Informações Geográficas

Os sistemas de informações geográficas (SIGs) são utilizados para manipulação de dados que representam objetos e fenômenos onde a localização geográfica é uma característica intrínseca indispensável à análise da informação (ARONOFF, 1989). Os SIGs são compostos por vários subsistemas integrados, e devem prover suporte a diferentes tipos de dados e aplicações, com

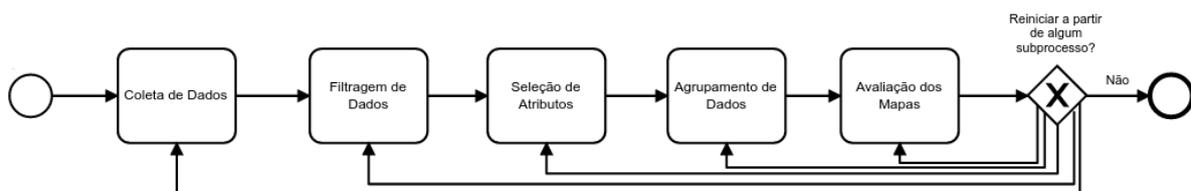
o intuito de centralizar os dados coletados de fontes heterogêneas de maneira transparente ao usuário final, por meio de funcionalidades de entrada, integração, processamento, visualização, plotagem, armazenamento e recuperação de dados (CIFERRI, 1995; CÂMARA et al., 1996). Atualmente, os SIGs trabalham de forma integrada com os SGBDEs para o armazenamento e recuperação de dados espaciais.

Dentre as ferramentas de SIG disponíveis no mercado, deve-se destacar a plataforma proprietária ArcGIS (ARCGIS, 2017), criada em 2001 pela empresa ESRI e amplamente disseminada, não só na comunidade de geoprocessamento, mas também na maioria das áreas de aplicação. Quando consideramos apenas o mercado de *software* livre e de distribuição gratuita, o QuantumGIS (ou QGIS) (QGIS, 2017) é o SIG mais utilizado. Além dos diversos complementos disponíveis para atividades de geoprocessamento, a possibilidade de implementação de algoritmos pelos próprios usuários e integração com outros SIGs e plataformas que possuem diversas bibliotecas relacionadas à geoestatística, geoprocessamento e mineração de dados, como o ambiente R (R, 2017), fazem com que o QGIS seja bastante disseminado entre os usuários e produtores de dados geoespaciais, principalmente quando o custo relacionado à aquisição de *software* é um fator relevante para o usuário.

Mineração de Dados

A transformação dos dados em conhecimento, com o intuito de fornecer suporte ao usuário final em atividades que exigem a tomada de decisão, é um dos principais motivadores para a utilização de conceitos de mineração de dados em AP, onde os valores dos atributos, que estão normalmente associados a coordenadas geográficas, podem ser influenciados por seus vizinhos espaciais (ESTER et al., 2000). A etapa de mineração de dados é considerada, em conjunto com o pré-processamento e o pós-processamento, como essencial em um processo de KDD (REZENDE, 2003). No contexto da AP, Santos, Molin e Saraiva (2013), Santos (2014) propuseram um modelo de referência para o processo de delineamento de UGDs (Figura 1). Esse modelo contempla todas as etapas do processo de KDD no âmbito da aplicação e foi utilizado como guia para a construção da arquitetura proposta neste artigo.

Figura 1: Modelo de referência para o processo de delineamento de UGDs.



Fonte: Extraído de Santos (2014)

Para a execução dos algoritmos que envolvem processos de KDD, o ambiente de desenvolvimento R (R, 2017) tem sido amplamente utilizado. O ambiente R permite o acesso aos seus

algoritmos que envolvem geoprocessamento por meio da interface do QGIS, com a utilização do complemento *Processing*. Esse complemento permite a criação de interfaces para usuários finais, e pode retornar como resultado tanto dados geoespaciais vetoriais como gráficos gerados pelos próprios algoritmos do ambiente R. Além disso, permite a criação de modelos para execução sequencial das interfaces de acesso criadas que definem *workflows* para um conjunto de aplicações.

Publicação de Dados Espaciais

Uma vez que o processo de delineamento de UGDs é finalizado, os mapas escolhidos pelo usuário final para serem utilizados em determinadas atividades devem ser armazenados para futuras consultas e até mesmo para disseminação via rede. Além do armazenamento direto dos dados espaciais em sua forma bruta no SGBDE, os mapas de UGDs também podem ser publicados no GeoServer diretamente pela interface do QGIS. Uma vez publicados, esses mapas podem ser acessados via *Web* por meio de sítios com funcionalidades de SIG compatíveis com os padrões OGC, conhecidos como *WebGIS* (MITCHELL, 2005). Um exemplo de sítios desse tipo é o GeoNode (GEONODE, 2017), uma plataforma de código aberto para compartilhamento de dados geoespaciais que permite ao usuário final explorar mapas disponibilizados por servidores como o GeoServer. Os mapas podem ser publicados diretamente no GeoNode por meio da interface gráfica do QGIS, utilizando o complemento OpenGeo.

Dados Geoespaciais

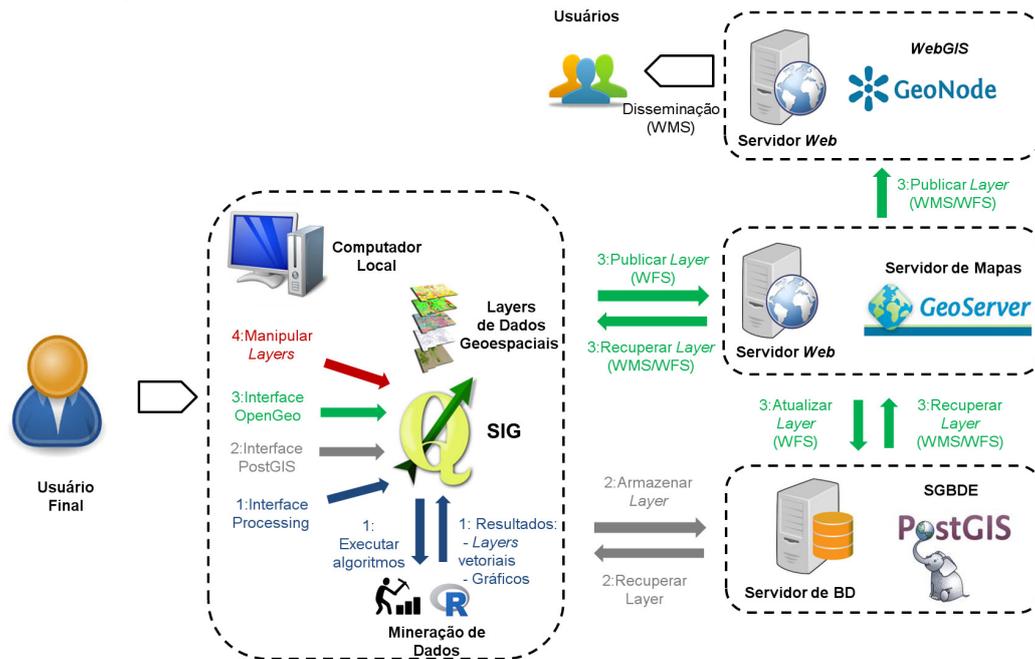
O conjunto de dados geoespaciais reais usado nos experimentos deste artigo foi obtido em um talhão de cultura de cana-de-açúcar de aproximadamente 17 hectares da Fazenda Aparecida, localizada em Mogi-Mirim, SP, com 20 atributos relacionados ao solo e a cultura, tais como pedologia, textura e condutividade elétrica do solo, índices de biomassa e produtividade. Para o delineamento de UGDs, a arquitetura proposta neste artigo permite ao usuário final: escolher os atributos que serão utilizados; submeter os dados a processos de limpeza para exclusão de valores extremos; realizar processos de interpolação espacial para acomodar os atributos em uma grade espacial única; delinear as UGDs utilizando algoritmos de agrupamento espacial; analisar os resultados obtidos por meio de critérios de validação; e publicar mapas finais de UGDs.

Na próxima seção, a arquitetura proposta é apresentada e comparada com outras soluções disponíveis na literatura, com o intuito de analisar as suas vantagens e desvantagens e também indicar melhorias que podem ser propostas para uma adequação maior ao processo à qual está sendo submetida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando as TICs descritas na seção Material e Métodos, foi proposto um modelo de arquitetura para permitir a realização da tarefa de delineamento de UGDs em AP, com a utilização de *software* livre e de distribuição gratuita (Figura 2).

Figura 2: Modelo de arquitetura para a tarefa de delineamento de UGDs em AP utilizando *software* livre e padrões OGC.



Nessa arquitetura, são observados quatro macroprocessos distintos que podem ser executados pelo usuário final. O primeiro, identificado pelo número 1, permite a integração da interface principal do QGIS com os algoritmos de mineração de dados disponibilizados pelo ambiente R, por meio da criação de *scripts* anotados utilizando o complemento *Processing*. Esses *scripts* geram janelas gráficas para que o usuário final informe os parâmetros e dados espaciais de entrada que serão utilizados pelos algoritmos de mineração de dados. Para os dados de saída, são permitidos tanto camadas vetoriais, que podem ser posteriormente manipuladas utilizando as funcionalidades específicas do QGIS, quanto figuras representando gráficos ou mapas gerados pelos próprios algoritmos de mineração de dados do ambiente R, visualizadas por meio do complemento *Processing* (Figura 3).

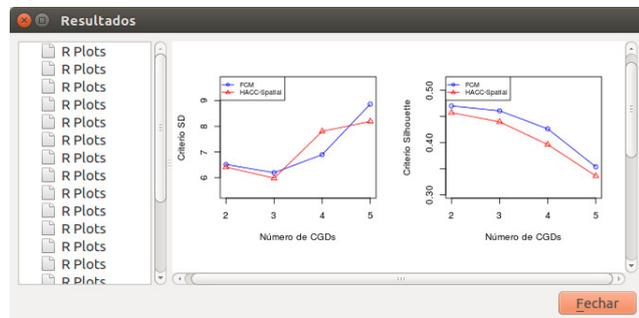
Além das diversas alternativas para entrada e saída de dados que a arquitetura proporciona, também é possível executar diversos algoritmos de mineração de dados de maneira sequencial, por meio da ferramenta de criação de modelos do complemento *Processing*. A Figura 4 mostra um exemplo de criação de um modelo para delineamento de UGDs, onde são executados sequencialmente algoritmos para limpeza de dados, criação de grade espacial única, interpolação espacial e agrupamento, até que o mapa vetorial de UGDs seja obtido.

O segundo macroprocesso definido na arquitetura da Figura 2, identificado pelo número 2,

Figura 3: Exemplos de resultados retornados por algoritmos de mineração de dados executados pelo ambiente R e integrados a interface do QGIS: (a) mapa de UGDs no formato vetorial com imagem de sensoriamento remoto ao fundo; (b) gráfico com análises considerando critérios de validação.

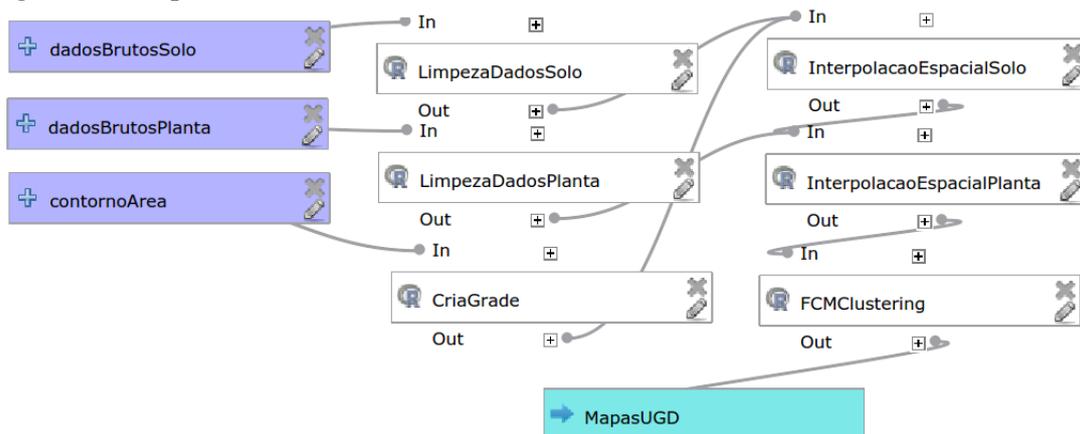


(a)



(b)

Figura 4: Exemplo de modelo para delineamento de UGDs com execução sequencial de diversos algoritmos implementados no ambiente R.



permite ao usuário final, a partir de funcionalidades específicas do QGIS, armazenar e recuperar os mapas de UGDs obtidos a partir do macroprocesso 1 diretamente no SGBDE PostGIS. Com os dados armazenados, o usuário final pode realizar o terceiro macroprocesso, identificado na arquitetura da Figura 2 pelo número 3, para disseminar pela rede os mapas de UGDs obtidos. As funcionalidades descritas para esse macroprocesso devem ser acessadas a partir da interface do complemento OpenGeo, disponível no QGIS. Por meio dessa interface, é possível publicar e recuperar mapas de UGDs já armazenados no SGBDE a partir do GeoServer, utilizando para isso os serviços OGC WFS e WMS. Utilizando a mesma interface do complemento OpenGeo, os mapas de UGDs disponibilizados no servidor de mapas GeoServer podem ser publicados no GeoNode, permitindo a sua disseminação pela rede por meio de uma interface *WebGIS* disponível para qualquer usuário que desejar utilizá-los.

Finalmente, um quarto macroprocesso, relacionado à manipulação de *layers*³ localmente

³*Layer*: Termo comumente utilizado pela comunidade de SIG para se referir a conjuntos de dados geoespaciais temáticos que podem ser visualizados ou manipulados.

pelo usuário final utilizando o SIG QGIS também foi definido na Figura 2, identificado pelo número 4. A manipulação local de *layers*, sejam elas representando dados espaciais brutos disponibilizados pelo GeoServer, ou mapas de UGDs delineadas a partir do macroprocesso 1, permite ao usuário final editá-las de maneira *off-line* utilizando as funcionalidades de geoprocessamento disponibilizadas pelo QGIS. Isso permite que essas *layers* sejam publicadas em um servidor de mapas apenas quando estiverem em sua versão final.

As ferramentas e complementos disponíveis no QGIS para a sua integração com o ambiente R e posterior publicação de mapas em *WebGIS* podem ajudar muito no processo de delineamento de UGDs em AP. Entretanto, algumas dificuldades foram encontradas durante a implementação e devem ser registradas para que melhorias possam ser propostas. Com relação à anotação de *scripts* para geração de interfaces, a limitação de tipos de campos disponíveis restringe a utilização de soluções alternativas em alguns casos, por exemplo quando existe a necessidade de informar mais de um atributo da camada de dados vetorial para ser utilizado pelo algoritmo a ser executado. Com relação aos gráficos gerados pelo ambiente R e exibidos na interface do QGIS, a janela para exibição de resultados (Figura 3 (b)) utiliza imagens de tamanho fixo que foram obtidas como retorno do algoritmo executado, limitando a sua visualização e manipulação pelo usuário final. Outras dificuldades também são encontradas com relação às mensagens de retorno de execução dos algoritmos, realizada por meio de uma janela textual que dificulta a identificação de possíveis erros que possam vir a ocorrer.

Com relação às ferramentas disponíveis na literatura, algumas questões podem ser discutidas. A primeira ferramenta computacional que surgiu para auxiliar o usuário final no delineamento de UGDs em AP foi o *software Management Zones Analyst* (MZA) (FRIDGEN et al., 2004), o qual é ainda muito utilizado em diversas abordagens da literatura. O MZA possui funcionalidades importantes que fornecem estatísticas descritivas para análise e escolha do melhor mapa de UGDs a ser utilizado. Entretanto, sua disponibilidade para instalação apenas sob o sistema operacional Windows, exigência de dados de entrada já em uma grade espacial única, e indisponibilidade de acesso a bases de dados e serviços *Web*, limitam o seu uso se considerarmos os conceitos atuais de TICs e o processo de KDD que envolvem o delineamento de UGDs em AP. A arquitetura proposta neste artigo visa resolver algumas dessas questões, possibilitando ao usuário final obter dados de diversas fontes, e que podem passar por todas as etapas do KDD até a extração final do conhecimento em mapas de UGDs.

Com o objetivo de prover uma solução acessível pela *Web* aos usuários finais, disponibilizando imagens de sensoriamento remoto e uma interface amigável e simples de ser utilizada, Zhang et al. (2010) desenvolveram o aplicativo *ZoneMap*. Segundo experimentos realizados pelos autores, o *ZoneMap* permite o delineamento de mapas de UGDs bastante compatíveis com mapas delineados manualmente pelos usuários finais. Entretanto, uma dificuldade que pode ser observada é a necessidade dos usuários finais informarem os seus dados vetoriais a um sistema externo, mesmo que este esteja instalado em servidores de universidades ou órgãos governamentais. Com relação à essa questão, a arquitetura proposta neste artigo permite que

o usuário final trabalhe os seus dados em seu ambiente local, utilizando um SIG, e publique, por exemplo, apenas mapas de UGDs finais em um servidor que pode ser externo à sua rede de trabalho.

A possibilidade de utilização dos padrões OGC para aplicações em AP já vem sendo estudada a algum tempo. Murakami et al. (2007) propuseram uma estrutura completa para desenvolvimento de sistemas em AP utilizando esses padrões, que posteriormente foi atualizada e incluída em um portal *Web* para serviços agrícolas (RIBEIRO-JÚNIOR, 2007). O trabalho de Nash, Korduan e Bill (2009) também mostrou a eficiência do uso de padrões OGC em atividades de AP que exigem processamento paralelo, possibilitando a execução dessas atividades utilizando diversos servidores distintos. Nesse sentido, a arquitetura proposta neste artigo também teve como objetivo estabelecer um modelo baseado nos padrões da OGC, porém já estabelecendo opções de ferramentas livres e de distribuição gratuita que podem ser utilizadas sem custos pelo usuário final. A Tabela 1 resume as principais características das soluções encontradas na literatura no que diz respeito ao acesso, entrada e saída de dados, em comparação com a arquitetura proposta.

Tabela 1: Resumo das características das soluções da literatura com relação à proposta de arquitetura apresentada.

Ferramenta	Tipo Aplicação	Fontes de Dados	Saídas
<i>Fridgen et al. (2004)</i>	Desktop	Arquivo ASCII	Arquivo ASCII Arquivo Estatísticas Arquivo Indicadores Gráficos
<i>Murakami et al. (2007)</i>	Web	OGC: WMS,WFS,WCS	OGC: WCS, WMS,WFS
<i>Nash, Korduan e Bill (2009)</i>	Web	OGC: WMS,WFS,WCS	OGC: WMS,WFS,WCS
<i>Zhang et al. (2010)</i>	Web	Arquivo ASCII Arquivo Raster BD Imagens	Arquivo ASCII Arquivo Raster Arquivo Shape
<i>Arquitetura Proposta</i>	Desktop / Web	OGC: WMS,WFS	OGC: WMS,WFS Gráficos

A partir da Tabela 1, verifica-se que, diferentemente das soluções disponíveis na literatura, a arquitetura proposta possibilita ao usuário final manipular os dados espaciais por meio de um SIG *Desktop*, contendo todas as funcionalidades de geoprocessamento úteis para a aplicação e que, por muitas vezes, possuem custo computacional elevado de execução. Entretanto, as fontes de dados devem ser remotas, e serem acessadas a partir de requisições a provedores de serviços da OGC. O acesso às fontes de dados é realizado de maneira semelhante pelas outras soluções, exceto para a solução desenvolvida por Fridgen et al. (2004), onde é permitida apenas a utilização de um formato específico de arquivo, a ser informado pelo usuário final. Com relação à saída de resultados, a arquitetura proposta proporciona, além das camadas de dados

geoespaciais nos formatos OGC, gráficos de avaliações qualitativas a respeito dos resultados obtidos. Esse tipo de indicador também é fornecido pela abordagem desenvolvida por Fridgen et al. (2004).

CONCLUSÕES

A utilização de TICs livres e de distribuição gratuita integradas em uma arquitetura única possibilitou a análise de que é possível executar processos importantes como o delineamento de UGDs em AP utilizando os conceitos de descoberta de conhecimento em bancos de dados. Outras soluções disponíveis na literatura mostram que, ao longo do tempo, está se estabelecendo uma tendência de utilização de novas tecnologias para processos agrícolas que envolvem TICs, capazes de aumentar a interoperabilidade entre sistemas e auxiliar a tomada de decisão do usuário final.

Com relação à arquitetura proposta neste artigo, deve-se destacar o uso de ferramentas livres e de padrões OGC, realizado de maneira similar em outras soluções disponíveis na literatura. Por outro lado, a arquitetura proposta possibilita ao usuário final a manipulação dos dados espaciais de maneira local, permitindo a utilização de funcionalidades de geoprocessamento computacionalmente custosas. Essa característica pode ser interessante ao usuário final, à medida que é desejável que apenas mapas finalizados devem ser publicados e visualizados por outros usuários.

A arquitetura proposta ainda deve levar em consideração o estabelecimento de melhorias que podem tornar os seus módulos mais independentes. Uma dessas melhorias está relacionada ao acesso aos algoritmos de geoprocessamento e mineração de dados executados utilizando o ambiente de desenvolvimento R, que na versão atual da arquitetura devem estar instalados localmente em conjunto com o SIG no computador local do usuário final. Para tornar esse módulo mais independente, uma nova proposta da arquitetura, considerando a utilização de uma versão servidor do ambiente R, o RServe (RSERVE, 2017), está sendo elaborada. Nessa nova proposta, os algoritmos serão executados diretamente no servidor, por meio de requisições do serviço WPS diretamente do SIG para o RServe, utilizando a ferramenta WPS4R (HINZ et al., 2013). Assim, algoritmos específicos poderão ser disponibilizados apenas no servidor, evitando a necessidade de instalação e atualização em computadores locais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fazenda Aparecida e as pesquisadoras da Embrapa Célia Regina Grego e Cristina Aparecida Rodrigues, pela disponibilidade dos dados coletados para uso experimental neste artigo. Agradecemos também as agências de fomento em pesquisa CNPq, CAPES, FAPESP e FINEP. O primeiro autor é apoiado pelo programa de pós-graduação da Embrapa, e o segundo autor, pela bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq número 311868/2015-0.

REFERÊNCIAS

- ARCGIS: Esri arcgis. 2017. Disponível em: <<http://www.arcgis.com/>>. Acesso em: 02 mai. 2017.
- ARONOFF, S. Geographic information systems: A management perspective. *Geocarto International*, v. 4, n. 4, p. 58, 1989. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10106048909354237>>.
- BERNARDI, A. C. d. C. et al. *Agricultura de Precisão - Resultados de um Novo Olhar*. 1. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2014. 596 p.
- BURROUGH, P. A. Principles of GIS for land resources assessment. *Monographs on soil and resources survey*. Clarendon, Oxford, 1986.
- CÂMARA, G. et al. *Anatomia dos Sistemas de Informações Geográficas*. [S.l.]: Campinas-SP: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996.
- CASANOVA, M. A. et al. *Bancos de Dados Geográficos*. Curitiba: MundoGeo, 2005. 506 p.
- CIFERRI, R. R. *Um benchmark voltado a análise de desempenho de sistemas de informações geográficas*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- COMPARETTI, A. Precision Agriculture: Past, Present and Future. In: *Agricultural Engineering and Environment*. Akademija, Lithuania: [s.n.], 2011. p. 17.
- ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. *Fundamentals of Database Systems*. 6th. ed. Boston: Addison-Wesley, 2011. 1172 p. ISSN 14337851. ISBN 9780136086208.
- ESTER, M. et al. Spatial Data Mining: Database Primitives, Algorithms and Efficient DBMS Support. *Data Min. Knowl. Discov.*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 4, n. 2-3, p. 193–216, 2000. ISSN 1384-5810. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1009843930701>>.
- FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. The KDD Process for Extracting Useful Knowledge from Volumes of Data. *Commun. ACM*, ACM, New York, NY, USA, v. 39, n. 11, p. 27–34, 1996. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/240455.240464>>.
- FRIDGEN, J. J. et al. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agronomy Journal*, v. 96, p. 100–108, 2004.
- GEONODE: Open source geospatial content management system. 2017. Disponível em: <<http://geonode.org/>>. Acesso em: 04 mai. 2017.
- GEOSERVER. *Open Source Server for Sharing Geospatial Data*. 2017. Disponível em: <<http://geoserver.org/>>. Acesso em: 08 mai. 2017.

HINZ, M. et al. Spatial Statistics on the Geospatial Web. In: *The 16th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Short Papers*. [S.l.: s.n.], 2013.

LI, M.; CHUNG, S.-O. Special issue on precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier B.V., v. 112, p. 1, 2015. ISSN 01681699. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169915000897>>.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. *Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura*. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informática Agropecuária, 2014. 411 p. ISBN 978-85-7035-414-3.

MITCHELL, T. *Web mapping illustrated: using open source GIS toolkits*. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2005.

MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão: Situação atual e perspectivas. In: FANCELLI, A. L.; NETO, D. D. (Ed.). *Milho: Estratégias de Manejo para Alta Produtividade*. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2003. p. 89–98.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. *Agricultura de precisão*. Oficina de Textos, 2015. ISBN 9788579752148. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=MX7jCgAAQBAJ>>.

MURAKAMI, E. et al. An infrastructure for the development of distributed service-oriented information systems for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 58, n. 1, p. 37–48, ago. 2007. ISSN 0168-1699. Disponível em: <dx.doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.010>.

NASH, E.; KORDUAN, P.; BILL, R. Applications of open geospatial web services in precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, Springer US, v. 10, n. 6, p. 546–560, 2009. ISSN 1385-2256. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-009-9134-0>>.

ORACLE. *Oracle Documentation*. 2017. Disponível em: <<http://docs.oracle.com>>. Acesso em: 02 mai. 2017.

PERCIVALL, G. et al. *OGC Reference Model*. Open Geospatial Consortium Inc., 2003. 108 p. Disponível em: <<http://www.opengeospatial.org/standards/orm>>.

POSTGRESQL. *PostgreSQL Documentation*. 2017. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/docs/9.5/static/docguide.html>>. Acesso em: 02 mai. 2015.

QGIS: A free and open source geographic information system. 2017. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

R. *The R Project for Statistical Computing*. 2017. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

REZENDE, S. O. *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2003. ISBN 8520416837.

RIBEIRO-JÚNIOR, L. C. M. *Uma Arquitetura de Software para Sistemas Espaço-Temporais Baseados na Web para Agricultura de Precisão*. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-01082007-182328>>.

RSERVE: Binary r server. 2017. Disponível em: <<http://rforge.net/Rserve>>. Acesso em: 08 mai. 2017.

RUSS, G. *Spatial Data Mining in Precision Agriculture*. 251 p. Tese (Doktoringenieur) — Otto-von-Guericke-University of Magdeburg, 2012.

SANTOS, R. T. dos. *Um modelo de referência para o processo de definição de zonas de manejo em agricultura de precisão*. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, 2014.

SANTOS, R. T. dos; MOLIN, J. P.; SARAIVA, A. M. A Reference Process for Management Zone Delineation. In: *EFITA Conference - Sustainable Agriculture through ICT Innovation*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 8.

WEISS, S. M.; INDURKHYA, N. *Predictive Data Mining: A Practical Guide*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998. ISBN 978-1558604032.

ZHANG, X. et al. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. *Precision Agriculture*, Springer US, v. 11, n. 2, p. 103–114, 2010. ISSN 1385-2256. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-009-9130-4>>.