UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA

JULIANA EXEL SANTANA

REPRESENTAÇÃO DA ÁREA DE RESPONSABILIDADE DE JOGADORES DE FUTEBOL ATRAVÉS DO DIAGRAMA DE VORONOI

Campinas
2011

JULIANA EXEL SANTANA

REPRESENTAÇÃO DA ÁREA DE RESPONSABILIDADE DE JOGADORES DE FUTEBOL ATRAVÉS DO DIAGRAMA DE VORONOI

Dissertação de Mestrado apresentada à Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Educação Física na Área de Concentração Biodinâmica do Movimento Humano.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA FEF - UNICAMP

Sa59r

Santana, Juliana Exel.
Representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol através do Diagrama de Voronoi / Juliana Exel Santana. - Campinas, SP: [s.n], 2011.

Orientador: Sérgio Augusto Cunha.
Dissertação (mestrado) – Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.

1. Futebol. 2. Tática. 3. Voronoi, Diagramas de. I. Cunha, Sérgio Augusto. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título.

(asm/fef)

Título em inglês: Representation of football players responsability areas through Voronoi Diagram.
Palavras-chaves em inglês (Keywords): Football. Tactics. Voronoi Diagram.
Área de Concentração: Biodinâmica do Movimento Humano.
Titulação: Mestrado em Educação Física.
Banca Examinadora: Sergio Augusto Cunha. Luiz Eduardo Barreto Martins. João Frederico da Costa de Azevedo Meyer.
Data da Defesa: 04/02/2011.

JULIANA EXEL SANTANA

REPRESENTAÇÃO DA ÁREA DE RESPONSABILIDADE DE JOGADORES DE FUTEBOL ATRAVÉS DO DIAGRAMA DE VORONOI

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Juliana Exel Santana e aprovada pela Comissão julgadora em: 04/02/2011.

Sergio Augusto Cunha
Orientador

Campinas
2011

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha
Orientador

Prof. Dr. Luiz Eduardo Barreto Martins

Prof. João Frederico da Costa de Azevedo Meyer

Dedicatória

“O dia escureceu de vez.
Nunca imaginei ficar assim,
Perdendo a minha lucidez
Meu chão sumiu dos pés diante de mim.

Um novo dia já nasceu.
É bom sentir os pés no chão
E saber que ainda estás aqui.

Com minhas mãos, eu toco o céu,
Enquanto elevo o coração.
E posso dizer: sou livre sim.

Trouxe em minha lembrança...
O sonho que vivi foi tão real.
Alimentei a esperança
E assim sobrevivi ao temporal.

Um novo dia já nasceu.
É bom sentir os pés no chão
E saber que ainda estás aqui.
Com minhas mãos eu toco o céu, enquanto elevo o coração,
E posso dizer: sou livre sim!”

Dedico este trabalho e todo meu amor a Deus, aos meus pais Eliana e Jucelino, e ao meu irmão Juninho.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ouvir minhas dores em meu silêncio e me alentou nos momentos importantes.

Agradeço aos meus pais Jucelino e Eliana, e também ao meu irmão Juninho pelo amor, pela paciência e por acreditarem nos meus sonhos junto comigo.

Agradeço ao meu orientador, professor Sergio Augusto Cunha, pelas oportunidades de aprender e desenvolver um pouco de ciência. Agradeço também a toda sua família pelo acolhimento e pela grande amizade que fizemos.

Agradeço ao grande professor e amigo Luiz Eduardo Barreto Martins pelas horas dispensadas em me ensinar que humildade e sabedoria e diversão andam lado a lado.

Agradeço ao professor João Frederico da Costa de Azevedo Meyer pela colaboração importantíssima feita ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Espero um dia ter um pouco da sua humildade, vivacidade e conhecimento.

Agradeço aos professores Ricardo Machado Leite de Barros e René Brenzikofer pelos ensinamentos que contribuíram muito para todo o processo de desenvolvimento deste trabalho e também para todas as minhas atividades desenvolvidas ao longo do mestrado.

Agradeço também aos meus colegas de laboratório Ana Lorena, Márcio, Jerusa, Marião, Feco, Milton, Juliana Paris, Juliana Landolfi, Fernanda, Amanda, Angélica, Aline, Ana Francisca, Rafael, Karine e Preto pela grande amizade e parceria construída ao longo desses 3 anos.

Finalmente agradeço ao meu namorado Felipe, que além de um admirável e importante colega de trabalho, é também aquele com quem tenho compartilhado meu amor, minhas alegrias e minhas angústias. Você é muito especial.

Aos muitos dos que de alguma forma contribuíram para toda a minha trajetória nesse curso e que não estão sendo citados aqui, também dedico os meus sinceros agradecimentos.

SANTANA, J.E. **Representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol através do Diagrama de Voronoi**. 2010. 61f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

RESUMO

O desempenho de jogadores de futebol de elite durante uma partida é diretamente influenciado por fatores físicos, psicológicos, técnicos, táticos e entre outros. Um suporte científico capaz de buscar e aplicar metodologias que quantifiquem esses fatores é uma fonte importante de informações para que técnicos e treinadores tenham melhores condições de efetuar uma boa preparação da sua equipe. Dentro dos estudos cinemáticos no esporte, a videogrametria tem se mostrado uma ferramenta acurada para a obtenção da posição dos jogadores em função do tempo. Dentro dos aspectos táticos de um jogo de futebol, a forma como uma equipe divide o campo em áreas de responsabilidade e como essa distribuição se dá ao longo do jogo pode ser descrita através de técnicas matemáticas. Nesse sentido, o objetivo deste estudo será apresentar uma forma de representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol durante partidas oficiais, através do Diagrama de Voronoi. Para tal, foram coletadas as imagens de 4 jogos de futebol. Os processos de segmentação das imagens e de rastreamento dos jogadores para a obtenção dos dados 2D em função do tempo foram realizados através do *software* DVideo®. Para as análises, foi aplicado a metodologia do Diagrama de Voronoi nas coordenadas 2D de 33 jogadores de uma mesma equipe, a cada instante de tempo, em cada jogo. Dado um conjunto de pontos no plano (que nesse caso, representam as posições dos jogadores em função do tempo), o Diagrama de Voronoi divide o plano em regiões de acordo com as distâncias entre os pontos desse conjunto, chamados Polígonos de Voronoi. As áreas dos polígonos foram calculadas. Essa ferramenta permite, através de uma representação por mapas de superfície, obter um resumo dos locais do campo contidos nos Polígonos de Voronoi associados a cada jogador, durante todo o jogo. As áreas de responsabilidade foram maiores para goleiros, laterais e atacantes, quando comparados aos zagueiros e volantes e meias.Para caracterizar a região de responsabilidade dos jogadores, foi utilizado o contorno topográfico correspondente às áreas do campo contidas nos Polígonos dos jogadores por no mínimo 60% do jogo. Os resultados obtidos para os jogos estudados mostram que o contorno que caracteriza a área de responsabilidade para os jogadores é uma boa ferramenta qualitativa e quantitativa, que representa a forma como os jogadores dividem a área do campo entre si. A utilização do Diagrama de Voronoi se mostrou uma técnica eficiente na determinação das áreas de responsabilidade dos jogadores. Técnicos e treinadores podem dessa maneira obter informações adicionais importantes para a criação de melhores estratégias de posicionamento da sua equipe para uma melhor cobertura do espaço do campo de futebol.

Palavras-Chaves: futebol; tática; Diagrama de Voronoi.

Santana, J.E. **Representation of football players' responsibility areas through Voronoi Diagram**. 2010. 61f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ABSTRACT

The performance of football elite players is directly influenced by physical, psychological, technical and tactical aspects. A scientific support capable of seek and apply methodologies to quantifying these factors is an important source of information to coaches improve their conditions to well prepare their teams. About football tactical aspects, the manner a team share the pitch in responsibility areas and how this distribution behaviours during the match can be described through mathematical techniques. Thus, the aim of this study is to show players' responsibility area during official matches using Voronoi Diagram (VD). To do so, we collected images of 4 football matches. To extract 2D players' coordinates during the entire match, images segmentation, tracking and 2D reconstruction were performed in DVideo® software. In the analysis, VD method was applied to players' 2D coordinates to all 33 players of a same team, at each instant of time and in the 4 matches. Given a set of points on plan (representing players positions as function of time), VD share the plan in regions according to distances between all points of the set, called Voronoi polygons (VP). Voronoi areas were calculated a determined as players' responsibility areas. This tool permits obtaining a summary of pitch locations inside Voronoi polygons of each player, during the entire match, using hitmaps. To characterize responsibility areas, the contours of hitmaps corresponding to pitch areas inside VP by, at least, 60% of the match were performed. The results showed contours as an effective tool to qualitatively and quantitatively represent responsibility areas in a match. Besides, mathematical properties related to known geometric structures, as convex polygons, facilitate calculating areas. They showed be higher to goalkeepers, external defenders and forwards when compared to central defenders, defensive and offensive midfielders.

Keywords: football; tactics; Voronoi Diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação das 20 medidas sobrepostas do posicionamento de um atacante durante uma partida (Cunha, Binoto e Barros, 2001).....	18
Figura 2 -	McGarry et al. (2002). Algumas possibilidades inter e intra-grupos para duas equipes. A equipe da metade acima utiliza uma formação 4-4-2 e a segunda utiliza uma formação 3-5-2. D = defensores, M = meio-campistas, A = atacantes.....	21
Figura 3 -	Representação da região de atuação de jogadores de futebol durante um tempo de uma partida, a partir da análise por componentes principais (Menezes et al., 2005).	22
Figura 4 -	Resultados de uma tentativa de agrupamento de algumas "categorias táticas". Em a) estão os grupos os quais se deseja identificar através da metodologia. Em b), c) e d) estão representados os processos de identificação destes grupos através de técnicas de *cluster* (Kon e Haseyama, 2007).....	23
Figura 5 -	I: Regiões nas quais o campo foi dividido para o registro das ações. II: Indicação da posição dos jogadores e a movimentação em um padrão encontrado (correndo com a bola em direção ao gol para realização de uma finalização) (Borrie, Jonsson e Magnusson, 2002).....	23
Figura 6 -	Representação do desempenho de jogadores de futebol em uma partida (Duch, Waitzman e Amaral, 2010).	25
Figura 7 -	I: Representação das regiões possíveis entre dois jogadores. II: Representação das regiões de competição e de segurança entre jogadores (Chan-Hyun, 2006).....	26
Figura 8 -	Diagrama de Voronoi construído a partir da formação inicial dos jogadores na partida. Os números representam os jogadore das 2 equipes (Kim, 2004).....	27
Figura 9 -	Enquadramento das câmeras.....	32
Figura 10 -	Interface do DVideo® para a edição dos algoritmos usados no processo de segmentação das imagens, em que os objetos de interesse (jogadores) são extraídos do fundo.....	34

Figura 11 -	De a até f são os *blobs* criados para a sequência de imagens. Em I temos os nós dos grafos (informação espacial do blob) e as arestas que ligam os nós (informação temporal do blob).....	35
Figura 12 -	Demonstração de como é formado o Diagrama de Voronoi. Em a, p_1 é o primeiro sítio e representa um jogador. Em b, a reta r_1 determina a distância entre o par de sítios p_1 e p_2, que são os mais próximos naquele plano. Em c, a reta r_2 é a mediatriz da reta r_1 (formando a primeira aresta). Em d, é demonstrado como as arestas são formadas entre 3 sítios (p_1, p_2 e p_3). Em d, temos uma célula de Voronoi formada por 3 arestas e por 4 sítios.....	39
Figura 13 -	Exemplo do Diagrama de Voronoi construído a partir da posição dos jogadores em um instante de tempo.....	40
Figura 14 -	Resultados de uma tentativa de agrupamento de algumas "categorias táticas". Em a) estão os grupos os quais se deseja identificar através da metodologia. Em b), c) e d) estão representados os processos de identificação destes grupos através de técnicas de *cluster* (Kon e Haseyama, 2007).....	41
Figura 15 -	I: Regiões nas quais o campo foi dividido para o registro das ações. II: Indicação da posição dos jogadores e a movimentação em um padrão encontrado (correndo com a bola em direção ao gol para realização de uma finalização) (Borrie, Jonsson e Magnusson, 2002).....	42
Figura 16 -	Exemplo das altitudes que representam os valores de frequência encontrados para os locais do campo com incidência dos Polígonos de Voronoi para um jogador.....	44
Figura 17 -	Exemplo de um gráfico de superfície representado bidimensionalmente, no plano do campo.....	44
Figura 18 -	Demonstração de como foi calculado o contorno para a representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol durante um jogo.....	45
Figura 19 -	Medianas das áreas de responsabilidade no 1° Tempo do Jogo 3, a cada 15 minutos. Em anexo estão os Diagramas de Voronoi em 3 instantes de tempo diferentes em situações semelhantes as representadas pelas medianas.....	50
Figura 20 -	Medianas das áreas de responsabilidade no 2° Tempo do Jogo 3, a cada 15 minutos. Em anexo estão os Diagramas de Voronoi em 3 instantes de tempo diferentes em situações semelhantes as representadas pelas medianas	51
Figura 21 -	de superfície dos 11 jogadores de uma equipe durante o 1° tempo de uma partida.....	52
Figura 22 -	Mapas de superfície dos 11 jogadores de uma equipe durante o 2° tempo de uma partida.....	52
Figura 23 -	Contorno topológico para os 11 jogadores de uma equipe no 1° tempo do jogo. Estão ainda representados os centróides encontrados para cada contorno e as médias das coordenadas 2D de cada jogador.....	53

Figura 24 - Contorno topológico para os 11 jogadores de uma equipe no 2° tempo do jogo. Estão ainda representados os centróides encontrados para cada contorno e as médias das coordenadas 2D de cada jogador..... 54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CD	Zagueiros
CD1	Zagueiro 1
CD4	Zagueiro 4
CD6	Zagueiro 6
CI	Intervalo de confiança
DM	Volantes
DM1	Volante 1
DM4	Volante 4
FW	Atacantes
FW5	Atacante 5
FW6	Atacante 6
FW8	Atacante 8
GK	Goleiros
GK2	Goleiro 2
LED	Laterais-esquerdo
LED1	Lateral-esquerdo 1
OM	Meias
OM5	Meia 5
RED	Laterais-direito
RED1	Lateral-direito 1

SUMÁRIO

1 Introdução 15

2 Revisão de Literatura 20

3 Objetivos 29

3.1 Objetivos Gerais 29

3.2 Objetivos específicos 29

4 Justificativa 30

5 Materiais e Métodos 31

5.1 Imagens dos jogos e participantes 31

5.2 Medição 32

5.2.1 Medição manual 33

5.2.2 Medição semi-automática 33

5.2.3 Segmentação 34

5.3 Calibração, reconstrução bidimensional e suavização 36

5.4 Tratamento das coordenadas bidimensionais dos jogadores 36

5.5 Definição do Diagrama de Voronoi 37

5.5.1 Aspectos matemáticos do Diagrama de Voronoi 37

5.6 Construção do Diagrama de Voronoi 38

5.7 Aplicação do Diagrama de Voronoi e variáveis calculadas 39

5.8 Análises Estatísticas 45

6 Resultados 47

6.1 Áreas de responsabilidade dos jogadores 47

6.2 Mapas de superfície 51

6.3 Mapas de contorno topológico 53

7 Discussão 55

8 Conclusões 59

Referências 60

ANEXOS 63

1 Introdução

O desempenho de jogadores de futebol de elite durante uma partida é diretamente influenciado por fatores físicos, psicológicos, técnicos, táticos e entre outros. Um suporte científico capaz de buscar e aplicar metodologias que quantifiquem estes fatores é uma fonte importante de informações para que técnicos e treinadores tenham melhores condições de efetuar uma boa preparação da sua equipe.

Tendo em vista a necessidade da compreensão da interação entre todos estes aspectos do rendimento, em biomecânica, através da análise cinemática, é possível a obtenção de variáveis importantes a partir da posição de cada jogador no campo em função do tempo. As distâncias percorridas, velocidades atingidas e locais do campo em que foram realizadas ações podem oferecer indicadores do desempenho de atletas. Entretanto, a forma de aquisição desses dados de posição durante partidas oficiais é afetada pelas próprias características da modalidade como o tamanho do campo, o número de jogadores, a longa duração das partidas e a não permissão para os jogadores utilizarem instrumentos adicionais aos determinados pela FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*).

Nesse sentido, tecnologias computacionais e metodologias de análise de imagens durante partidas têm sido desenvolvidas (Liebermann et al., 2002; Figueroa, Leite e Barros, 2006) e melhoradas na última década, inovando na portabilidade dos equipamentos e fornecendo medidas cada vez mais precisas (Barris e Button, 2008).

Edgecomb e Norton (2006) compararam os dados de distância percorrida pelos jogadores obtidos com um sistema de posicionamento global (GPS) e um sistema computacional de rastreamento através de estimativa visual, encontrando valores de erro de 4.8% e 5.8%, respectivamente. Apesar de apresentar um menor erro quando comparado ao outro sistema, o uso do emissor de sinais durante o jogo não é permitido, de acordo com as regras do futebol, como já mencionado anteriormente.

Outra alternativa para o estudo de variáveis cinemáticas é a videogrametria. Esta ferramenta utiliza imagens de uma partida para análise ao vivo ou posterior à coleta, sem interferir nas regras do jogo ou causar qualquer desconforto ao jogador. Em Barros et al. (2007)

especificamente, foi utilizado o sistema de *tracking* automático DVideo para o rastreamento de 55 jogadores de futebol que atuaram em partidas do Campeonato Brasileiro da Primeira Divisão. De posse das coordenadas bidimensionais de cada jogador, as distâncias percorridas em diferentes faixas de velocidade foram calculadas. Os resultados demonstraram que os laterais, meias e volantes apresentaram uma maior distância percorrida do que os atacantes, e que os atacantes apresentaram uma maior distância percorrida comparada aos zagueiros. Com relação às faixas de velocidade, os modos parado, andando e trotando apresentaram as maiores distâncias, estando todos estes resultados em acordo com os estudos de outros autores utilizados para comparação. O estudo de validação deste sistema, realizado por Misuta (2004), consistiu em percorrer uma distância de 2924 m e verificar quão próximo deste valor o sistema DVideo apresentaria o valor medido. Os resultados demonstraram que a resolução espacial foi estimada em 0.3 m em relação à posição absoluta no campo e para a distância percorrida o erro foi de apenas 1.35%.

A partir da utilização do *tracking*, tem-se enfatizado o estudo de variáveis físicas. Porém, a busca pela vitória em esportes coletivos, e em especial no futebol, se relaciona principalmente com dois conceitos que merecem destaque: técnica e tática (Carmichael, Thomas e Ward, 2000; Cunha, Binoto e Barros, 2001; Lees, 2002).

Lees (2002) conceitua a técnica como "uma sequência específica de movimentos", levando em consideração a descrição da posição relativa e a orientação dos segmentos corporais, e também a sua modificação durante a realização de uma tarefa esportiva para que esta seja concluída de forma efetiva. O autor ainda descreve que a técnica é caracterizada por variáveis que podem ser visualmente percebidas, como por exemplo, variáveis de velocidade e deslocamento linear e angular, e sua ocorrência temporal.

Hughes e Bartlett (2002) reportam que os aspectos táticos refletem a importância relativa do uso da velocidade, do espaço, da condição física e do movimento dos atletas dentro dos esportes coletivos. A tática é então a forma com que os jogadores utilizam estes aspectos entre si ou com relação aos seus oponentes, levando em conta as qualidades e as fraquezas técnicas dos respectivos atletas envolvidos. Como conseqüência, isso exerce influência na maneira pela qual são realizados os ataques e defesas individual e coletivamente, na maneira pela qual o espaço é aproveitado no campo de jogo e da variedade de ações que são produzidas.

O entendimento destes dois conceitos é de extrema importância para que os dados relacionados às ações de jogadores de futebol e sua posição em função do tempo sejam interpretados de forma correta. *Softwares* capazes de fornecer o registro das frequências de sucesso e fracasso das ações técnicas, além de associar a posição dos jogadores no campo de jogo no momento de execução destas, também têm sido amplamente utilizados em esportes coletivos. Moura (2006) analisou as estratégias que precedem as finalizações de equipes de futebol, verificando as ações e as seqüências de ações que antecedem essas finalizações. Através do *software* Dvídeo, o autor observou em seus resultados que a ação "passe", e as seqüências "domínio – passe" e "domínio – condução – passe" são as mais realizadas entre os jogadores. Foi observado também que as ações e sequência de ações curtas são as mais frequentes antes das jogadas serem finalizadas. O estudo também revelou, a partir dos dados analisados, que as retomadas de posse de bola ocorrem mais frequentemente no campo de defesa.

Nesse sentido, a ideia de posicionamento dos jogadores dentro do espaço do campo e o seu comportamento ao longo de uma partida têm motivado pesquisadores à utilização de técnicas matemáticas para descrever e representar aspectos táticos.

Cunha, Binoto e Barros (2001) analisaram a variabilidade das medidas do posicionamento de jogadores de futebol, obtidos através do *software* "Skout". Este *software* simula um campo de jogo no qual a posição dos jogadores é marcada de uma forma visualmente estimada, no momento da execução de uma ação técnica. As coordenadas de cada jogador, a princípio em *pixels*, são então convertidas para uma escala real em metros, a partir da proporção entre a medida virtual do campo simulado e a medida real do campo de futebol. As ações e a posição de um atacante durante um tempo de jogo foram registradas 20 vezes pelo mesmo operador. A representação da posição desse jogador foi feita através do cálculo das componentes principais, em que, a partir da matriz contendo as coordenadas X e Y desse jogador, são calculadas as covariâncias entre estas coordenadas para encontrar os autovetores e autovalores. Os autovetores são ortogonais entre si, com o ponto de intersecção centrado nas medianas dos eixos X e Y (vertical e horizontal). O comprimento dos eixos foi determinado de forma a evitar a influência de pontos extremos na sua posição, sendo fixado em 90% dos pontos marcados, neste estudo. A variabilidade foi medida pelo intervalo interquartil do *boxplot* das coordenadas X e Y da mediana e do ângulo de inclinação do primeiro autovetor nas 20 medições. As medianas apresentaram uma variabilidade de 0.5m para a coordenada X e de 1.25m para a coordenada Y,

além de 2.42° para o ângulo de inclinação dos eixos principais. A Figura 1 mostra a representação do posicionamento do atacante durante a partida analisada.

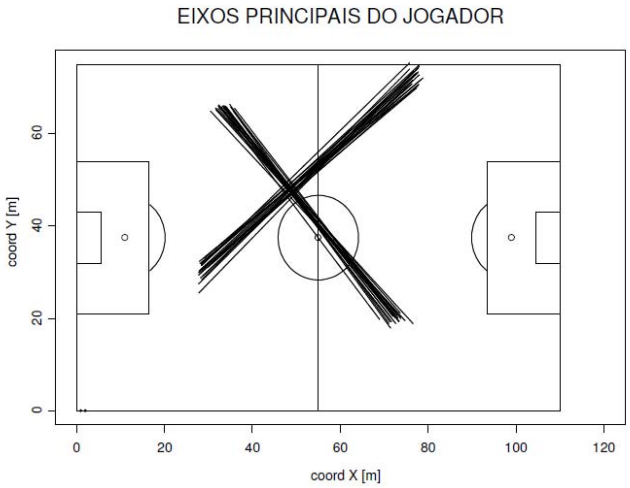

Figura 1 – Representação das 20 medidas sobrepostas do posicionamento de um atacante durante uma partida (Cunha, Binoto e Barros, 2001).

Também em acordo com Reep e Benjamin (1968), Hughes e Bartlett (2002) colocam que a efetividade e segurança das ações não variam de uma tentativa de passe de um companheiro para outro, mas sim em como o ataque se movimenta para transpassar a defesa adversária. Por sua vez, a equipe adversária se posiciona de forma a melhorar a chance de realizar um desarme e recuperar a posse de bola, seja compactando a formação ou estando mais próximos da bola. Sendo assim, os estudos sobre aspectos táticos de um jogo de futebol devem ser direcionados para a análise das equipes como uma unidade que ocupa o espaço delimitado pelo campo e que se movimenta com o objetivo de chegar ao gol ou retomar a posse de bola.

A forma como uma equipe divide o campo em áreas de dominância para cada jogador e como essa distribuição se dá ao longo do jogo pode ser descrita através de ferramentas matemáticas, principalmente as que possuem propriedades bem conhecidas. Modelos caracteristicamente geométricos, como o permitido pela aplicação do Diagrama de Voronoi (Kim, 2004; Santana et al., 2009), fazem uma decomposição do espaço de jogo em regiões em

torno dos jogadores, levando em consideração a distância entre eles. Assim, pode-se visualizar uma estrutura com a região que cada jogador domina, em função dos seus companheiros de equipe, a cada instante de tempo.

É a partir do estudo das características táticas de um jogo de futebol que o objetivo deste trabalho se fundamenta. Neste, propõe-se um método de caracterização e quantificação da área de responsabilidade de jogadores de futebol durante partidas, através do Diagrama de Voronoi.

2 Revisão de Literatura

A ciência nos esportes coletivos tem como papel conciliar estudos sobre as características individuais dos atletas às demandas do jogo. O resultado implica na forma com que os jogadores utilizam essas características entre si e entre seus oponentes. Muitos pesquisadores têm voltado suas atenções para o estudo das movimentações dos jogadores em campo a fim de detectar e descrever as principais táticas adotadas pelos treinadores durante partidas, através de diferentes modelos.

McGarry et al. (2002) revisam uma proposta de análise do desempenho esportivo considerando o esporte no contexto dos sistemas dinâmicos. O objetivo de estudo nessa abordagem foi investigar a habilidade de uma equipe em desestabilizar o adversário e restabelecer sua estabilidade nos momentos críticos do jogo, para dessa forma obter um perfil tático do jogo. Uma das características dos sistemas dinâmicos associadas ao desempenho é a mudança em algum parâmetro de ordem (algum padrão associado aos componentes individuais do sistema) como resultado de ajustes em algum parâmetro de controle (tentativa de finalização). No futebol, considera-se a distribuição dos jogadores em uma dada região do campo (Figura 2) e a sua consequente movimentação (ou o esquema tático observado) como o parâmetro de ordem. Já o parâmetro de controle é alguma propriedade no jogo que limita o comportamento dos sistemas dinâmicos, ou seja, que limita a movimentação da equipe em função da posse de bola. Através da anotação das ações realizadas, são identificados os tipos de perturbação capazes de mudar a relação de simetria entre ataque e defesa, até o acontecimento de uma finalização.

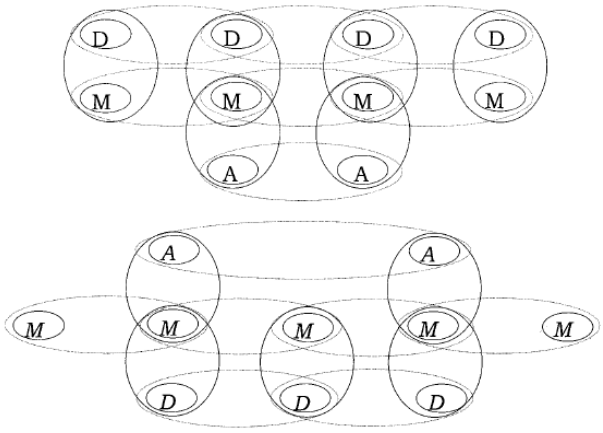

Figura 2 - McGarry et al. (2002). Algumas possibilidades inter e intra-grupos para duas equipes. A equipe da metade acima utiliza uma formação 4-4-2 e a segunda utiliza uma formação 3-5-2. D = defensores, M = meio-campistas, A = atacantes.

Menezes et al. (2005) utilizaram a análise da trajetória de cada jogador para descrever o comportamento tático durante partidas. Os autores verificaram a variabilidade da representação por componentes principais de 60 jogadores, a fim de verificar em qual momento do jogo ela se apresenta estável e descreve seu comportamento tático para o todo o período do jogo. A posição dos jogadores foi obtido através do rastreamento automático dos jogadores pelo *software* DVideo®, a partir do método proposto em Figeroa, Leite e Barros (2006), a uma frequência de aquisição de 7.5 Hz. Neste trabalho, o ângulo da primeira componente e o eixo longitudinal do campo foram calculados de forma acumulada, a cada 2 segundos de partida. Foram obtidas então curvas de desvio-padrão acumulados para a análise da variabilidade em função do tempo. Na Figura 3 estão representadas as componentes principais de todos os jogadores de uma equipe em um período de jogo. Os resultados mostraram que o tempo médio para a estabilização da representação por componentes principais foi de aproximadamente 18 minutos, o que demonstra a possibilidade de caracterizar o posicionamento tático de uma equipe sem precisar analisá-la durante todo o período.

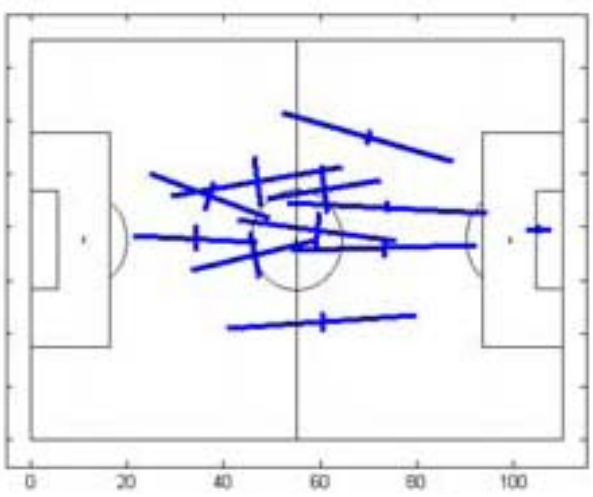

Figura 3 – Representação da região de atuação de jogadores de futebol durante um tempo de uma partida, a partir da análise por componentes principais (Menezes et al., 2005).

Uma vez que o sucesso em uma partida é determinado também pela maneira na qual os indivíduos se interagem entre companheiros de equipe e oponentes, o estudo da organização de uma equipe se torna extremamente relevante.

A interação defesa-ataque foi estudada através da aplicação de um modelo de *cluster*, a partir de imagens de jogos de futebol (Kon e Haseyama, 2007). Nessa metodologia, os jogadores foram agrupados de acordo com o que foi chamado de grupos táticos. Para a formação desses grupos, levou-se em consideração a distância euclidiana entre os eventuais jogadores de ambas as equipes que participaram de determinadas jogadas. Para a realização do agrupamento, foram gerados grafos baseados nas distâncias entre jogadores. Grafos são geralmente utilizados para gerar uma idéia de relação entre objetos. Graficamente, é apresentado por uma figura com nós ou vértices que representam os objetos, e linhas conectoras entre os nós, chamadas arestas, que representam a relação imaginada. No caso desse trabalho, os nós representam os jogadores e as arestas representam a distância euclidiana entre os jogadores. Assim, dois jogadores que estavam mais próximos com relação a um limiar de distância pré-determinado, pertenciam ao mesmo grupo. Algumas situações de jogo foram capturadas para a aplicação dessa metodologia. Alguns exemplos foram: um ataque que terminou em um cruzamento, um ataque não-concluído e uma situação de impedimento. De um total de 94 quadros e a partir dos grupos táticos os quais se

desejava identificar (exemplo na Figura 4a), em 81 quadros os grupos foram identificados corretamente, representando as relações entre ataque-defesa ocorridas em determinadas jogadas, como mostradas na Figura 4.

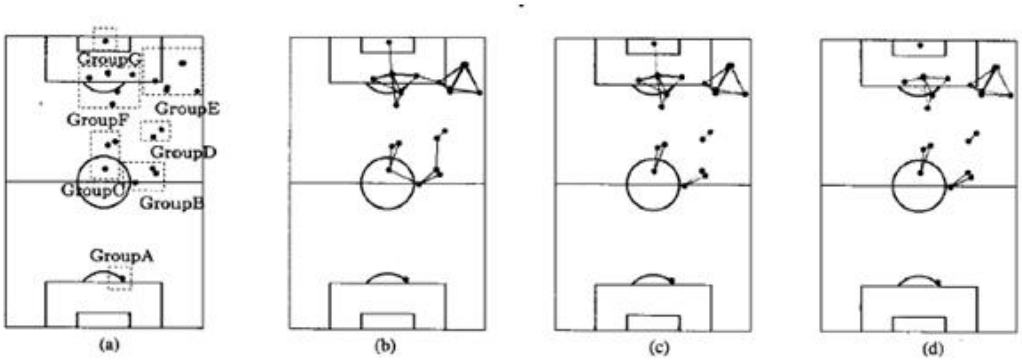

Figura 4 – Resultados de uma tentativa de agrupamento de algumas "categorias táticas". Em a) estão os grupos os quais se deseja identificar através da metodologia. Em b), c) e d) estão representados os processos de identificação destes grupos através de técnicas de *cluster* (Kon e Haseyama, 2007).

Borrie, Jonson e Magnusson (2002) estudaram uma forma de encontrar e de representar padrões nas sequências de ações técnicas realizadas durante o jogo, além de identificar o local onde ocorreram. Vídeos de 13 partidas (gravados em uma frequência de 25 Hz) foram obtidos e codificados através do *software* Theme, capaz de operacionalizar a detecção de padrões. Para a codificação, informações sobre a posição no campo (Figura 5I), jogador e ação técnica realizada foram utilizadas.

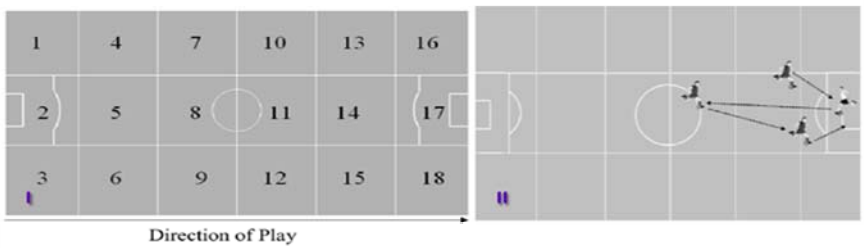

Figura 5 – I: Regiões nas quais o campo foi dividido para o registro das ações. II: Indicação da posição dos jogadores e a movimentação em um padrão encontrado (correndo com a bola em direção ao gol para realização de uma finalização) (Borrie, Jonsson e Magnusson, 2002).

Um padrão foi definido como uma combinação de ações técnicas consecutivas, que ocorrem com diferenças temporais entre elas, de forma relativamente invariante, assumindo que cada componente (ação técnica) fosse independente entre si e distribuída randomicamente pelo tempo. Primeiramente os padrões mais simples foram encontrados, como por exemplo, identificando as combinações entre dois tipos de ações, para então padrões mais complexos (combinações de padrões mais simples) serem detectados. A proposta oferecida pelos autores demonstrou ser capaz de identificar grupos de ações técnicas que ocorrem mais frequentemente em jogos de futebol, associando-as entre si para identificar padrões, além de levar em consideração os locais do campo em que ocorreram.

Duch, Waitzman e Amaral (2010) analisaram o desempenho de jogadores de futebol durante o Campeonato Europeu de 2008, em uma tentativa de quantificar características individuais que contribuem com o desempenho da equipe. Inspirados em um método utilizado em análises de redes sociais, os autores utilizam uma representação por grafos dos jogadores que atuaram nas partidas. Os nós representam os jogadores e suas posições em campo e as arestas que ligam os nós entre si representam as ações técnicas realizadas (Figura 6). As informações sobre as ações e posição dos jogadores durante as partidas foram obtidas pelo material coletado e publicado online pelo *website* http://euro2008.uefa.com. Este estudo definiu as ações de passe (somente os realizados de forma correta, ou seja, os que foram realizados e chegaram a um jogador de mesma equipe) e finalização (somente as finalizações em direção ao gol) como ações capazes de descrever a capacidade de um jogador em se movimentar com a bola em direção ao gol da equipe adversária. A largura das arestas correspondeu à quantidade dessas ações realizadas de forma correta entre dois jogadores. A cor dos nós diferenciou os jogadores que realizaram mais passes corretos (vermelho) dos que realizaram mais passes errados (amarelo), e o tamanho dos nós esteve relacionado com o grau de desempenho dos jogadores (combinação do desempenho de passes e chutes), conforme a Figura 6.

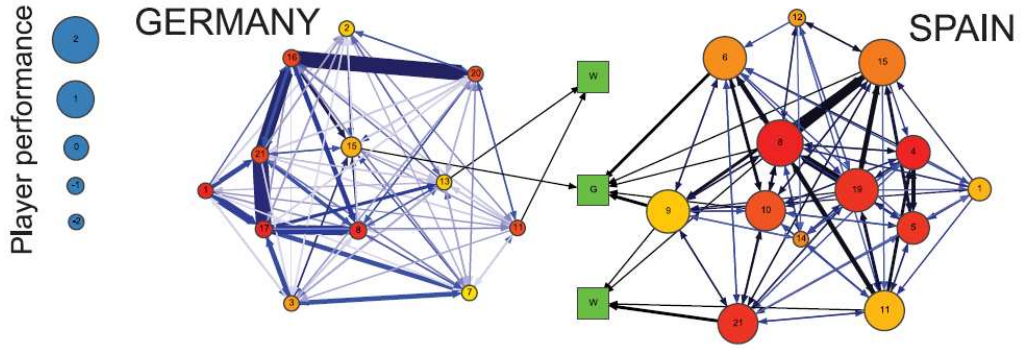

Figura 6 – Representação do desempenho de jogadores de futebol em uma partida (Duch, Waitzman e Amaral, 2010).

Chan-Hyun (2006) propôs o estudo das estratégias adotadas por equipes através da relação da trajetória dos jogadores e da bola. Os dados foram obtidos através de um jogo de simulação de futebol, a cada 2 segundos. Só foi registrada a trajetória realizada pelos jogadores durante a sequência das 3 ações consideradas: recepção da bola, condução e passe para algum companheiro de equipe. Para relacionar a trajetória dos jogadores com o desempenho tático, primeiramente foi estimada uma região em que um objeto (m) em movimento possivelmente estaria em um determinado instante (t), chamada de "região possível" (denotada por PR (m,t_0,t), sendo $t_0 \leq t \leq t_0 + \mu$, onde μ é uma constante dependente da velocidade do jogador e da bola). Os autores computaram também o local onde um jogador poderia receber um passe de um companheiro de equipe, através da chamada "região alcançável" (CR), que foi calculada como a interseção entre a PR de um jogador que vai receber o passe em um instante t ($t_{kick} < t$) e a PR estimada para a trajetória da bola nesse mesmo instante (CR (k, p, t_{kick},t)). A Figura 7 (I) demonstra um exemplo desta região.

Neste estudo, jogadores habilidosos foram definidos como aqueles capazes de realizar passes em uma região em que apenas um jogador de sua equipe pudesse recebê-la, ou também que, em regiões ocupadas também por adversários, fosse capaz de recuperar a posse de bola. Para quantificar essas regiões e, posteriormente avaliar esta habilidade, foram também definidas as "regiões de competição" e "regiões seguras", como mostradas na Figura 7 (II). A "região de competição" compreendeu a área de intersecção entre a PR de um jogador e as PR dos seus adversários. Já a "região segura" foi a área sobressalente às regiões que fizeram intersecção entre um jogador e seus adversários.

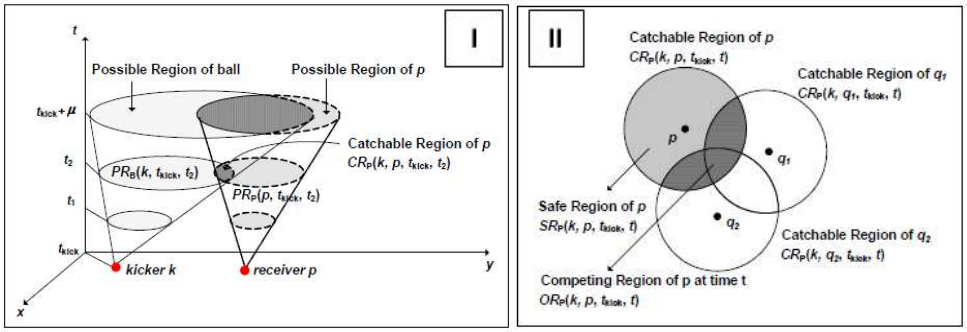

Figura 7 – I: Representação das regiões possíveis entre dois jogadores. II: Representação das regiões de competição e de segurança entre jogadores (Chan-Hyun, 2006).

Os resultados apresentaram que os jogadores com, respectivamente, maiores médias de CR, região de competição e região segura foram um meio-campista, um zagueiro e também um meio-campista.

Um diferente método para análise tática de jogos de futebol foi feita por Kim (2004). O autor propõe a aplicação do Diagrama de Voronoi para quantificar a contribuição individual ou o comportamento coletivo de uma equipe durante uma partida. Dados alguns pontos no plano, o Diagrama de Voronoi divide o plano de acordo com a regra do vizinho mais próximo: cada ponto é associado com a região do plano mais próxima a ele. Em outras palavras, considera-se um conjunto de pontos coplanares P. Para cada ponto $\overrightarrow{x_i}$ no conjunto P, pode-se desenhar uma borda que inclua todos os pontos intermediários que estão mais próximos de $\overrightarrow{x_i}$ do que de qualquer outro ponto no conjunto P. Esta borda é chamada de Polígono ou Célula de Voronoi, e o conjunto de todos os polígonos para o conjunto P é chamado de Diagrama de Voronoi do conjunto P (Aurenhammer, 1991).

A investigação foi realizada através da gravação em vídeo de alguns instantes de uma partida de vídeo game, a qual, após passar por técnicas de processamento, forneceu a posição dos jogadores relativas a esses instantes. Um total de 5979 quadros foram analisados. O Diagrama de Voronoi foi então construído a partir das coordenadas 2D obtidas (Figura 8).

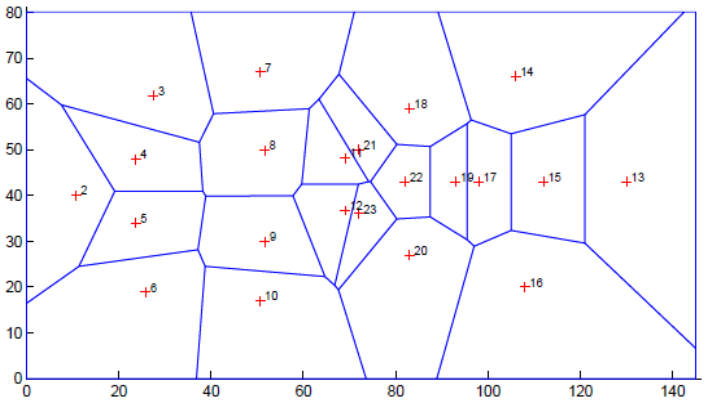

Figura 8 – Diagrama de Voronoi construído a partir da formação inicial dos jogadores na partida. Os números representam os jogadores das 2 equipes (Kim, 2004).

Os autores consideraram a área coberta por um polígono como uma área de responsabilidade ou de controle de um jogador. As áreas foram calculadas e, como já esperado para os jogadores de posições mais próximas às linhas limitrofes do campo, os goleiros (1904 ± 1020 *pixels* e 1254 ± 830 *pixels* para as duas equipes) e laterais (883± 477 *pixels* e 721 ± 451 *pixels* para laterais direitos, 749 ± 502 *pixels* e 562 ± 469 *pixels* para laterais esquerdos) apresentaram os maiores valores. Juntamente com o cálculo das áreas, os autores também calcularam uma razão entre essas áreas, que foi chamada de razão de dominância de uma equipe sobre a outra. Se um time dominasse outro em um dado período, a somatória das áreas dos seus polígonos de Voronoi seriam maiores do que a do adversário. Os resultados desta razão de dominância demonstraram um comportamento de alternância entre as duas equipes durante o período de jogo analisado.

Jogos de futebol entre robôs têm motivado alguns pesquisadores a também desenvolverem modelos para melhorar suas estratégias de posicionamento durante partidas. No trabalho de Dashti et al. (2006), é proposta uma abordagem diferente para uma maior flexibilidade no posicionamento dinâmico de robôs em simulações de jogos de futebol, também baseados em Voronoi. Este modelo permite que os robôs sejam capazes de reconhecer a melhor posição no campo, levando em consideração a distribuição da posição dos seus pares de equipe, criando novas estratégias para a execução da melhor ação.

A busca por um melhor entendimento dos fatores táticos de um jogo de futebol é constante e tem levado pesquisadores a demonstrarem diversas formas de representar esse tipo

de fenômeno. Mas o importante a ser notado entre os estudos citados acima é a semelhança na tentativa de desenvolvimento de ferramentas que permitam a visualização e quantificação de uma estrutura, o que facilita a percepção compreensão do objeto de estudo.

É dentro desta perspectiva que o Diagrama de Voronoi se mostra uma técnica que particiona o espaço nas regiões mais próximas de cada ponto, dando uma idéia de região de dominância. Além disso, apresenta na sua construção propriedades matemáticas relacionadas com muitas estruturas geométricas bem conhecidas, fazendo com que esta representação seja tida como uma das mais fundamentais estruturas definidas por um conjunto discreto de pontos (Aurenhammer, 1991). Entretanto, até o presente momento essa técnica foi utilizada apenas em simulações do futebol em jogos de vídeo-game e entre robôs, o que não representa necessariamente o fenômeno real.

O presente estudo se baseia na hipótese de que o Diagrama de Voronoi aplicado a dados reais de jogos de futebol pode se mostrar um caminho interessante para a representação e quantificação de aspectos táticos deste esporte, relacionados às regiões que envolvem cada jogador de acordo com o critério de proximidade, associando uma característica domínio de determinados jogadores para certos locais do campo.

3 Objetivos

3.1 Objetivos Gerais

Propor um modelo de representação das áreas de responsabilidade de jogadores de futebol através do Diagrama de Voronoi em jogos oficiais.

3.2 Objetivos específicos

- Aplicar a técnica do Diagrama de Voronoi para a determinação das áreas de responsabilidade dos jogadores em cada instante de tempo;

- Caracterizar as áreas de responsabilidade dos jogadores ao longo de todo o jogo, através de mapas de superfície e contornos topológicos.

4 Justificativa

No estudo do esporte, uma melhor compreensão do que acontece durante as competições é essencial para a aplicação de treinos cada vez mais específicos, o que torna o trabalho de treinamento mais adequado à modalidade e, consequentemente, aprimora o desempenho dos atletas.

É por esse motivo que os cientistas interessados em investigar o esporte buscam desenvolver e aprimorar técnicas de pesquisa capazes de quantificar os fenômenos ocorridos em ambiente de competição. Os sistemas de rastreamento automático de jogadores e de anotação de ações técnicas tem sido muito utilizados nas investigações sobre esportes como o futebol. Esta ferramenta tem propocionado aos profissionais da área um maior detalhamento das ações técnicas e táticas envolvidas num jogo de futebol. Embora essas sejam as premissas que estimulam pesquisas na área da Educação Física de forma objetiva, um fator importante deve ser levado em consideração: o modelo de representação do fenômeno estudado.

Especificamente sobre tática, ferramentas de apelo visual associadas a dados quantitativos apresentam uma melhor possibilidade de interpretação por facilitar a análise dos resultados por técnicos e treinadores. Nesse sentido, o Diagrama de Voronoi pode ser uma técnica interessante para estes objetivos. A aplicação desta técnica em dados coletados a partir de jogos reais, bem como os problemas a serem resolvidos para as situações particulares deste tipo de dado ainda não foram apresentados na literatura. É nesse sentido que o presente estudo pretende demonstrar uma metodologia capaz de quantificar e caracterizar a área de responsabilidade dos jogadores de futebol em partidas oficiais, por meio da referida técnica.

5 Materiais e Métodos

Os dados de posição dos jogadores em função do tempo foram obtidos através do Sistema Dvideo®, na sua interface desenvolvida especificamente para o futebol. O DVideo® (Figueroa, Leite e Barros, 2006) é um sistema criado para análise cinemática de movimentos baseado na videogrametria. O tratamento dos dados foi feito em ambiente Matlab® (versão 7.8), através do desenvolvimento de algoritmos específicos para os objetivos deste trabalho.

5.1 Imagens dos jogos e participantes

Foram registradas as imagens de 4 partidas de futebol válidas para a série A do Campeonato Brasileiro de 2008. Em todas essas partidas participaram 33 diferentes jogadores por, no mínimo, um tempo da partida . Esses jogadores foram classificados de acordo com a sua posição tática, como segue: goleiros (GK), laterais-direito (RED), laterais-esquerdo (LED), zagueiros (CD), volantes (DM), meias (OM) e atacantes (FW). Para isso, foram utilizadas de 4 a 6 câmeras filmadoras digitais, que registraram as imagens em fitas mini-DV, em uma frequência de aquisição de 30 Hz. Estas câmeras foram posicionadas em uma plataforma suspensa, que permitiu o enquadramento do campo através locais altos do estádio, permanecendo fixas durante todo o jogo. Cada câmera enquadrou uma parte do campo, de forma que todas juntas enquadrassem o campo inteiro, como representado na Figura 9.

Figura 9 – Enquadramento das câmeras.

Para que fosse possível a gravação desses jogos, foi necessária a autorização da emissora de televisão que detinha o direito de imagem dos jogadores. Após a aquisição das imagens em fita, foi feita a transferência das mesmas para um computador, em formato AVI (*Audio Video Interleaved*), com uma resolução de 480 linhas por 720 colunas. A sincronização das imagens foi realizada através da identificação de eventos em comum em cada uma das câmeras.

5.2 Medição

A seguir, serão descritos os procedimentos necessários até a obtenção das coordenadas bidimensionais de cada jogador em toda a partida.

O registro em vídeo dos movimentos de interesse possibilita a obtenção das coordenadas das imagens projetadas no monitor de um computador. Cada imagem, na tela do computador, assume a forma de uma matriz de pontos, em *pixels*. De toda a imagem formada, as coordenadas de tela (x,y) que interessam são apenas das regiões da imagem que formam o modelo do objeto que desejamos descrever a trajetória.

No Dvideo®, a determinação dessas coordenadas de tela da imagem pode ser feita através das medições automática, semi-automática e manual. As três formas de medição integradas permitem uma maior flexibilidade do sistema em função das condições experimentais específicas de cada estudo. Se em alguns momentos o *software* não identificar o jogador ou acabar medindo-o de forma insatisfatória, é necessária a intervenção do operador para uma correção. Essas correções são feitas de duas formas:

5.2.1 Medição manual

A medição manual é feita através da identificação visual do ponto de interesse pelo operador, que indica a posição do ponto na tela através do cursor (*mouse*).

5.2.2 Medição semi-automática

A medição semi-automática integra a ação do operador e recursos existentes para a detecção de padrões automaticamente.

Especificamente no *software* Dvideo®, é possível que, após correções manuais, seja retomado o modo de rastreamento automático. A medição automática envolve dois processos que possibilitam que um determinado jogador seja identificado nos quadros que formam a sequência de imagens: a segmentação e o rastreamento.

5.2.3 Segmentação

O jogador, o campo de futebol, as placas de propaganda, a arquibancada, entre outros, são elementos identificados na imagem por um conjunto de *pixels*. Um dos modos para realização da segmentação é a partir de extração de fundo da imagem. Esse procedimento consiste em identificar os objetos em movimento considerando uma sequência de quadros das imagens dos jogos. Alguns quadros são selecionados para a verificação da variação de intensidades de cor dos *pixels* que formam essa imagem. A imagem com os valores de *pixel* que não se alteram durante a sequência é considerada fundo. A partir disso, é feita uma operação de diferença, ou seja, imagem considerada fundo é subtraída do quadro corrente da sequência de imagens. Desse modo, através da segmentação, é possível a detecção e separação dos objetos de interesse (jogadores) dos outros elementos irrelevantes para a análise, como por exemplo: campo, torcedores, placas de propaganda, etc. O sistema DVideo® possui uma interface especial (Figura 10) que permite editar os algoritmos que realizam do processo da segmentação.

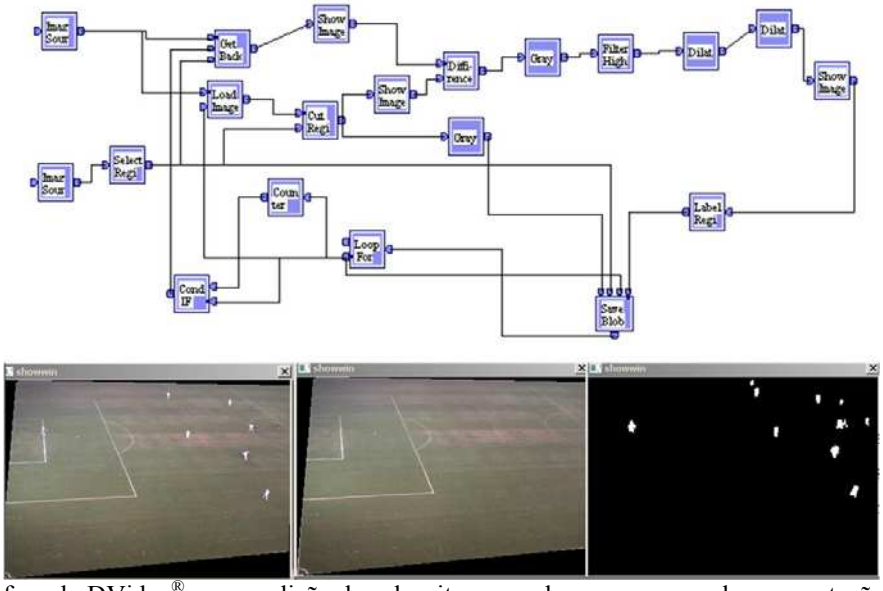

Figura 10 – Interface do DVideo® para a edição dos algoritmos usados no processo de segmentação das imagens, em que os objetos de interesse (jogadores) são extraídos do fundo.

Após esse processo, a imagem é binarizada e as regiões conexas encontradas são rotuladas e recebem o nome de *blobs*. Cada *blob* possui informações sobre tamanho (número de *pixels* que representa cada jogador), cor, perímetro e coordenadas bidimensionais que representam a posição do centro do *blob* na imagem.

As informações obtidas após a segmentação são um conjunto de pontos discretos que podem corresponder à trajetória dos jogadores na sequência de imagens, mas ainda não estão associadas aos respectivos jogadores. Para o de reconhecimento da trajetória de cada jogador em toda sequência de imagens de forma eficiente, foi aplicada a teoria de grafos.

O grafo pode ser representado por um conjunto de pontos (chamados de vértices) que são conectados por linhas (nomeadas arestas). Neste trabalho, um vértice representa um ou mais *blobs* e dois pontos só poderão estar conectados por apenas uma aresta. De acordo com (Szwarcfiter, 1984), um grafo pode ser visualizado através de uma representação geométrica, na qual seus vértices correspondem a pontos distintos do plano em posições arbitrárias, enquanto cada aresta é associada uma linha arbitrária unindo os pontos correspondentes. A Figura 11 apresenta a representação geométrica de um grafo a partir de uma seqüência de *blobs* criados em uma sequência de imagens.

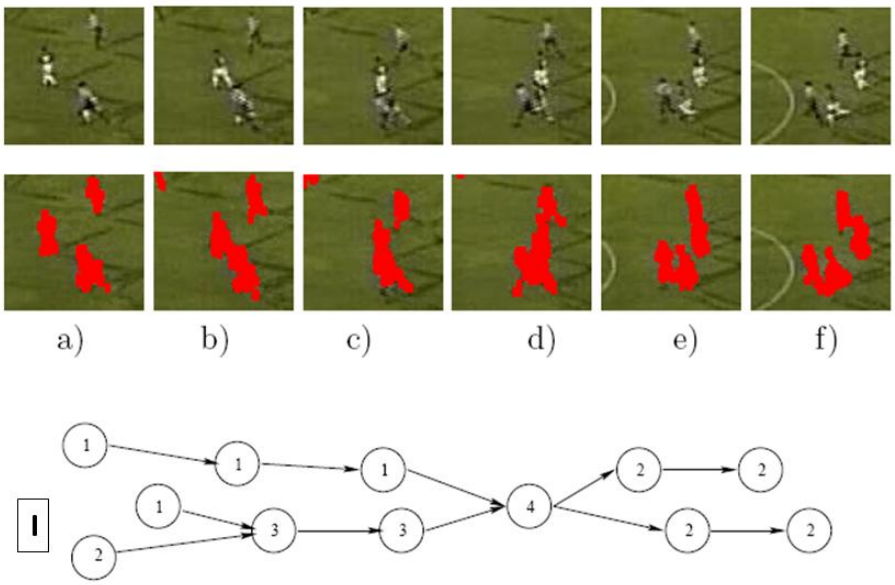

Figura 11 – De a até f são os *blobs* criados para a sequência de imagens. Em I temos os nós dos grafos (informação espacial do blob) e as arestas que ligam os nós (informação temporal do blob).

O rastreamento, então, é realizado a partir da construção de grafos utilizando as informações obtidas pelos *blobs*. Construído então o grafo a partir desses dados, o rastreamento foi realizado para cada jogador separadamente, informando ao *software* o atleta a ser rastreado no primeiro quadro. Uma vez selecionado o primeiro vértice, o sistema buscou informações sobre o próximo ponto, de acordo com o grafo criado.

5.3 Calibração, reconstrução bidimensional e suavização

Até agora, as medidas realizadas estão na unidade de *pixels*. Porém, o movimento estudado refere-se ao deslocamento de atletas em um campo de futebol com medidas em metros. Sendo assim, foi realizado o processo de calibração das câmeras e reconstrução das imagens para a obtenção dos dados espaciais a partir das projeções obtidas nas imagens. Para tal, foi utilizado o método "DLT – Direct Linear Transformation", proposto por (Abdel-Aziz e Karara, 1971), já implementado no DVideo®. O DLT consiste de um sistema de equações que é aplicado duas vezes: a primeira para quantificar os parâmetros da transformação (calibração) e a segunda para efetuar a reconstrução propriamente dita. Para a calibração, cada câmera continha informações de no mínimo quatro pontos do campo (linhas laterais, grande área, linha do meio campo, etc.), com distâncias conhecidas. Após a determinação dos parâmetros de calibração de todas as câmeras, é realizado o processo de reconstrução das coordenadas bidimensionais.

Após a reconstrução, as coordenadas de cada jogador foram suavizadas através do filtro digital *Butterworth* de 3ª ordem, numa frequência de corte de 0,4 Hz, disponível no *software* Matlab®.

5.4 Tratamento das coordenadas bidimensionais dos jogadores

Com o auxílio do das funções já implementadas no *software* Matlab®, algoritmos específicos foram desenvolvidos para a aplicação do Diagrama de Voronoi nas

coordenadas 2D dos jogadores (incluindo as quantificações das áreas de responsabilidade dos jogadores), para a análise estatística e para a apresentação dos resultados em gráficos de superfície e contornos topológicos. As representações dos gráficos de superfície e contornos topológicos foram apresentadas para os jogadores que atuaram mais do que 30% em cada período (acima de 25 minutos).

5.5 Definição do Diagrama de Voronoi

Primeiramente, é necessária a apresentação das definições e propriedades matemáticas do Diagrama de Voronoi. Neste trabalho, as bases matemáticas desta ferramenta foram buscadas em OKABE, A., BOOTS, B. e SUGIHARA, K. (1992).

O Diagrama de Voronoi é definido da seguinte forma: dado um conjunto S com, no mínimo, 2 pontos distintos no espaço Euclidiano, existe uma associação de toda a posição nesse espaço com o seu membro mais próximo no conjunto S, com respeito a distância Euclidiana. O resultado é a partição do plano em regiões convexas associadas com os membros de S. Essa partição é chamada de Diagrama de Voronoi gerado por S e as regiões que constituem o Diagrama são chamadas de polígonos de Voronoi (Aurenhammer, 1991). No presente estudo, as coordenadas bidimensionais dos jogadores de futebol, em cada instante de tempo, formarão o conjunto S no qual o algoritmo do Diagrama de Voronoi será aplicado.

5.5.1 Aspectos matemáticos do Diagrama de Voronoi

Como já reportado por Okabe, Boots, Sugihara (1992), matematicamente, considere *n* pontos no espaço Euclidiano e assuma que $2 \leq n \leq \infty$. Os *n* pontos são denominados por $p_1, p_2, \dots, p_n$, com Coordenadas cartesianas $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. Os *n* pontos são distintos e, consequentemente, $x_i \neq x_j$ e $y_i \neq y_j$, $i \neq j$; $i, j \in I_n = \{1, 2, \dots, n\}$. Deixe p_i ser um ponto

arbitrário no espaço Euclidiano com coordenadas Cartesianas (x_i, y_i). A distância Euclidiana entre p e p_i é definida por:

$$d(p,p_i) = \sqrt{[(x_{p_i} - x_p)^2 + (y_{p_i} - y_p)^2]} \quad (1)$$

Se p_i é o vizinho mais próximo de p, temos a relação:

$$d(p,p_i) \leq d(p,p_j) \quad (2)$$

com $i \neq j,\ i,j \in I_n = \{1,2,\ldots,n\}$. Essa relação retorna uma região convexa, chamada de polígono de Voronoi associado com p_i (também chamado por polígono de Voronoi de p_i) e o conjunto de polígonos é dado por:

$$\vartheta = \{V_{(p_1)}, V_{(p_2)} \ldots, V_{(p_n)}\} \quad (3)$$

Se $V_{(p_i)} \cap V_{(p_j)} \neq \emptyset$, o conjunto $V_{(p_i)} \cap V_{(p_j)}$ retorna uma aresta de Voronoi ($e_i(p_i,p_j)$). Essa interseção significa que os polígonos de Voronoi $V_{(p_i)}$ e $V_{(p_j)}$ são adjascentes. O ponto onde termina uma aresta é chamado de vértice de Voronoi, o qual pode ser dividido por, no mínimo, 3 polígonos de Voronoi.

5.6 Construção do Diagrama de Voronoi

Uma vez já definido que a região dada por $\vartheta = \{V_{(p1)}, \ldots, V_{(pn)}\}$ é um polígono, é importante lembrar de algumas características gerais deste tipo de construção:

- as regiões são formadas por n-1 intersecções de semi-planos, formando um polígono convexo,
- desde que um semi-plano é um conjunto convexo e os sítios são distintos, um Polígono de Voronoi não é vazio,

- as arestas são formadas por um conjunto de no máximo n-1 arestas (bissetrizes) e vértices (encontro das bissetrizes).

- cada ponto das Arestas é eqüidistante de exatamente dois sítios e cada vértice é equidistante de no máximo 3,

- os polígonos que partem o plano contêm exatamente *n* regiões.

- desde qualquer ponto no $\mathbb{R}^2$ é designado, no mínimo, para ser um dos sítios, os polígonos de Voronoi em $\mathcal{V}(P)$ são exauridos completamente neste espaço.

Simplificadamente, os algoritmos de construção do diagrama determinam as menores distâncias entre os pares de sítios do plano e é desenhada uma reta (Figura 12, b). Ortogonal a essa reta, é desenhada uma mediatriz (Figura 12, c). A menor área circundada por essas mediatrizes é chamada de Polígono de Voronoi de um determinado sítio (Figura 12, e).

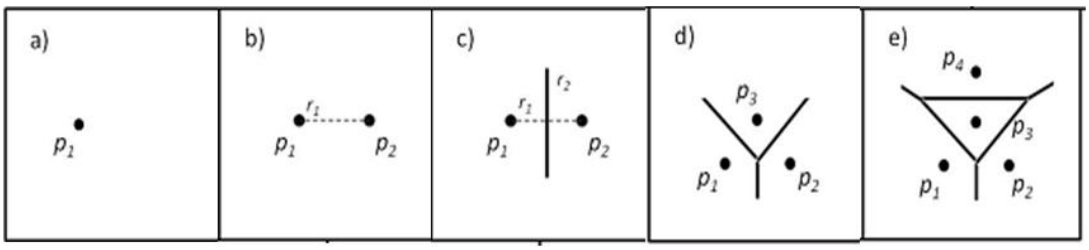

Figura 12 - Demonstração de como é formado o Diagrama de Voronoi. Em a, p_1 é o primeiro sítio e representa um jogador. Em b, a reta r_1 determina a distância entre o par de sítios p_1 e p_2, que são os mais próximos naquele plano. Em c, a reta r_2 é a mediatriz da reta r_1 (formando a primeira aresta). Em d, é demonstrado como as arestas são formadas entre 3 sítios (p_1, p_2 e p_3). Em d, temos uma célula de Voronoi formada por 3 arestas e por 4 sítios.

5.7 Aplicação do Diagrama de Voronoi e variáveis calculadas

Como já mencionado anteriormente, o diagrama de Voronoi foi construído a partir das coordenadas bidimensionais obtidas durante uma partida. As áreas dos polígonos de cada jogador foram determinadas como as suas respectivas áreas de responsabilidade.

Para o cálculo da área dos polígonos, primeiramente foi necessário obter os vértices dos polígonos de cada jogador em cada instante de tempo. Porém uma característica da construção do Diagrama de Voronoi que deve ser levada em consideração é que para os jogadores (pontos geradores do Diagrama) que ficam mais próximos das linhas limítrofes do campo, as arestas são formadas em direção ao infinito ou formam vértices além dos limites do campo (Figura 13). Isso acontece porque esses jogadores mais externos ao campo não possuem vizinhos com quem particionar o espaço, já que temos um número finito de jogadores em campo.

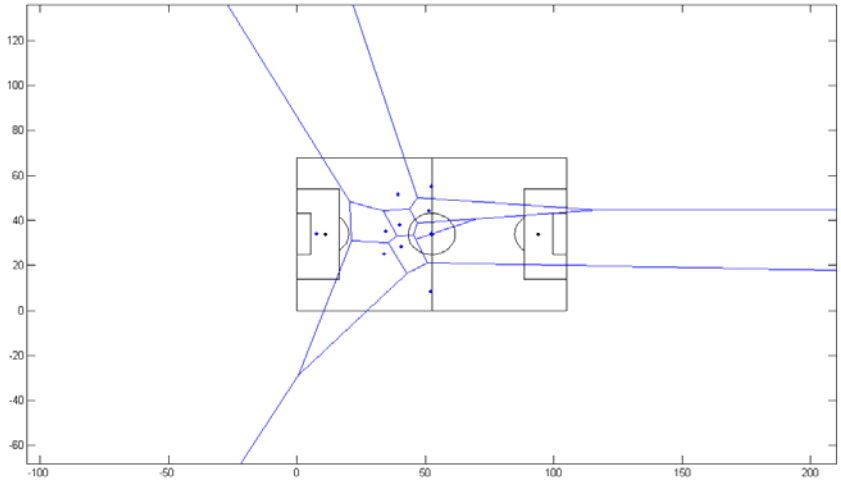

Figura 13 - Exemplo do Diagrama de Voronoi construído a partir da posição dos jogadores em um instante de tempo.

Apesar de existirem eventos durante uma partida nos quais os jogadores ultrapassam as linhas limítrofes, como é o caso da cobrança de lateral e escanteio, o presente trabalho leva em consideração as regiões sob domínio dos jogadores dentro dos limites do campo. Porém, como já observado, algumas características da construção do Diagrama não satisfazem essa condição.

Como solução para esse problema, as coordenadas dos 11 jogadores foram espelhadas ao redor do campo real, como no exemplo da Figura 14, para então ser aplicado o Diagrama de Voronoi.

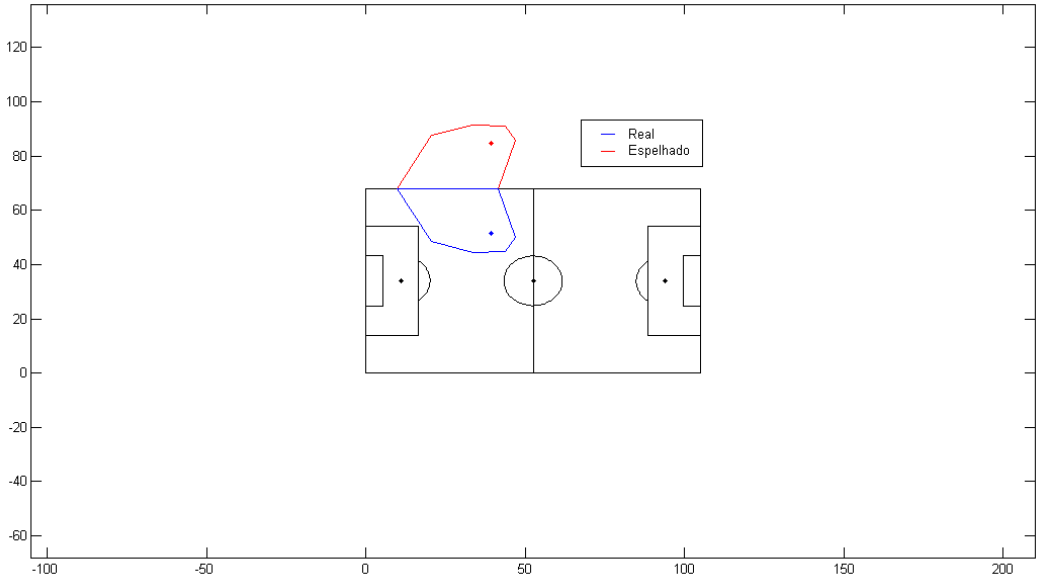

Figura 14 – Exemplo do espelhamento das coordenadas de um sítio e a construção da sua área de responsabilidade.

O espelhamento das coordenadas dos jogadores foi feito em 4 quadrantes ao redor do campo, de forma a contemplar todos os jogadores mais próximos das linhas limítrofes do campo de futebol, com dimensões reais de 105 m de comprimento por 68 m de largura. Primeiramente, foi criada uma matriz com aproximadamente 81.000 linhas (referentes aos quadros obtidos para 45 minutos de jogo em uma frequência de 30 Hz) por 55 colunas, uma vez que os 11 jogadores foram espelhados 4 vezes. As primeiras 11 colunas dessa matriz continham as coordenadas reais de cada jogador (x_n, y_n). As 11 subsequentes continham as coordenadas x de cada jogador foram multiplicadas por (-1) e os valores em y foram mantidos $(-x_n, y_n)$. Em seguida, mais 11 colunas foram adicionadas à matriz com as coordenadas em x mantidas e as em y diminuídas do dobro da largura do campo $(x_n, (2 \times 68) - y_n)$. Nas 11 colunas subseqüentes as coordenadas em x foram subtraídas do dobro do comprimento do campo e as coordenadas em y foram mantidas $((2 \times 105) - x_n, y_n)$. Por último, mais 11 colunas foram adicionadas, com as

coordenadas dos jogadores mantidas em x e as coordenadas em y multiplicadas por (-1) $(x_n, -y_n)$.

A partir da matriz com as coordenadas reais e as coordenadas espelhadas dos jogadores é que então foi aplicado o Diagrama de Voronoi. Na Figura 15 estão plotados os 5 Diagramas construídos para em um instante de tempo. Em I temos o Diagrama com as coordenadas reais dos jogadores, em II temos o Diagrama para as coordenadas $(-x_n, y_n)$, em III está o Diagrama feito com as coordenadas $(x_n, (2 \times 68) - y_n)$, em IV temos o Diagrama para as coordenadas $((2 \times 105) - x_n, y_n)$, em V temos o Diagrama de Voronoi com as coordenadas $(x_n, -y_n)$ de cada jogador.

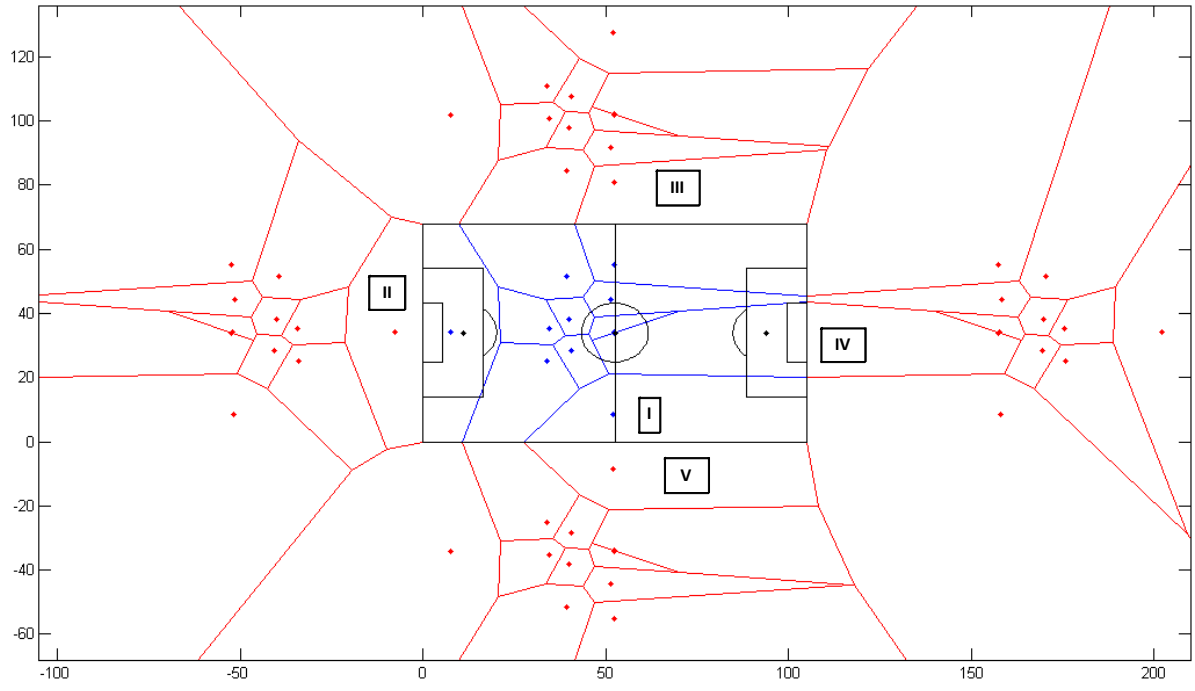

Figura 15 – Exemplo do espelhamento das coordenadas reais dos 11 jogadores (I) em 4 quadrantes ao redor do campo de futebol real (II, III, IV e V).

Dessa forma, foi possível encontrar os pontos relativos à intersecção das arestas dos polígonos mais externos com os limites do campo de futebol, incluindo essas informações como vértices dos polígonos desses jogadores, possibilitando assim a realização dos cálculos das

áreas de responsabilidade. A somatória das áreas dos 11 jogadores resulta na área do campo de futebol.

Como já citado anteriormente, as áreas de responsabilidade de cada jogador contemplam as áreas do campo envolvidas pelos respectivos Polígonos de Voronoi, que são obtidos em cada instante de tempo. Essas áreas foram então comparadas entre as 6 posições as quais os 33 jogadores participantes das partidas foram classificados.

A representação das áreas de responsabilidade dos jogadores durante toda a partida pode fornecer informações táticas sobre a organização de uma equipe. Acerca disso, uma das hipóteses para este fator é a diminuição das áreas dos GK, comparadas com as áreas dos FW, quando os jogadores estiverem se movimentando no campo defensivo. Por outro lado, no caso da equipe estar jogando no campo de ataque, espera-se que os GK apresentem maiores áreas de responsabilidade comparadas aos FW. Para a verificação dessa hipótese a somatória das áreas dos FW foi comparada com as áreas dos GK.

Também foram calculadas as medianas das áreas de responsabilidade dos jogadores a cada 15 minutos de jogo, e foram associadas a elas ilustrações do Diagrama de Voronoi para apresentar informações detalhadas da dinâmica da partida.

Para então ser representada qual a região do campo que mais tempo ficou sob responsabilidade de cada jogador durante toda uma partida, foram necessárias 2 etapas.

A primeira foi a representação da frequência da incidência de locais do campo contidos nos Polígonos de cada jogador, através de gráficos de superfície, também conhecidos como mapas de calor. Esse tipo de gráfico consiste em uma estrutura dividida em regiões escalonadas correspondentes aos valores dos elementos da matriz de dados que se deseja representar.

Inicialmente, o campo foi dividido em quadrantes de 0.2 metros para a verificação, a cada instante de tempo, de quais desses quadrantes do campo estavam contidos em cada Polígono de Voronoi. Feito esse processo para todo o jogo e para cada jogador, obteve-se a matriz com as informações dos locais do campo que estavam contidos nos Polígonos com maior frequência. No gráfico, as cores avermelhadas (“quentes”) representam os locais de maior frequência, enquanto que os locais com menores frequências são representados por cores azuladas (“frias”). Assim, uma vez que o gráfico de superfície é tridimensional, os locais do campo com maior frequência são representados como valores de altitude, conforme a Figura 16.

Para uma melhor visualização, os gráficos de superfície serão apresentados bidimensionalmente, no plano do campo, conforme a Figura 17.

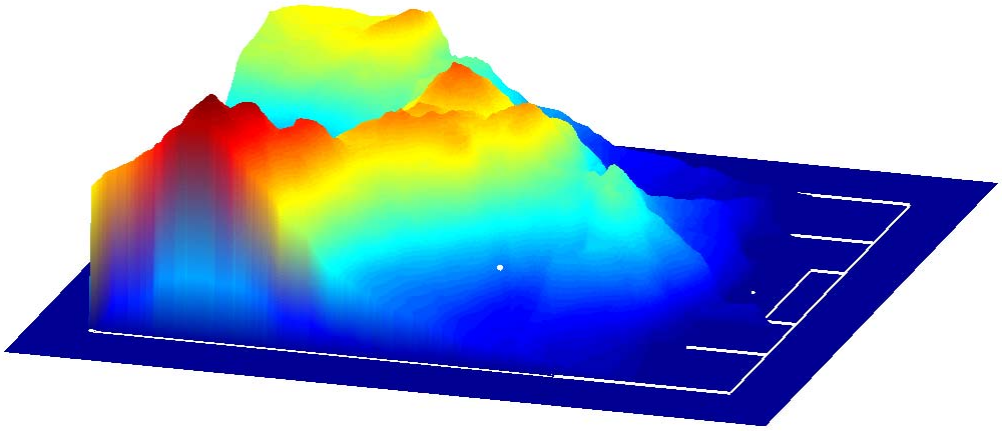

Figura 16 – Exemplo das altitudes que representam os valores de frequência encontrados para os locais do campo com incidência dos Polígonos de Voronoi para um jogador.

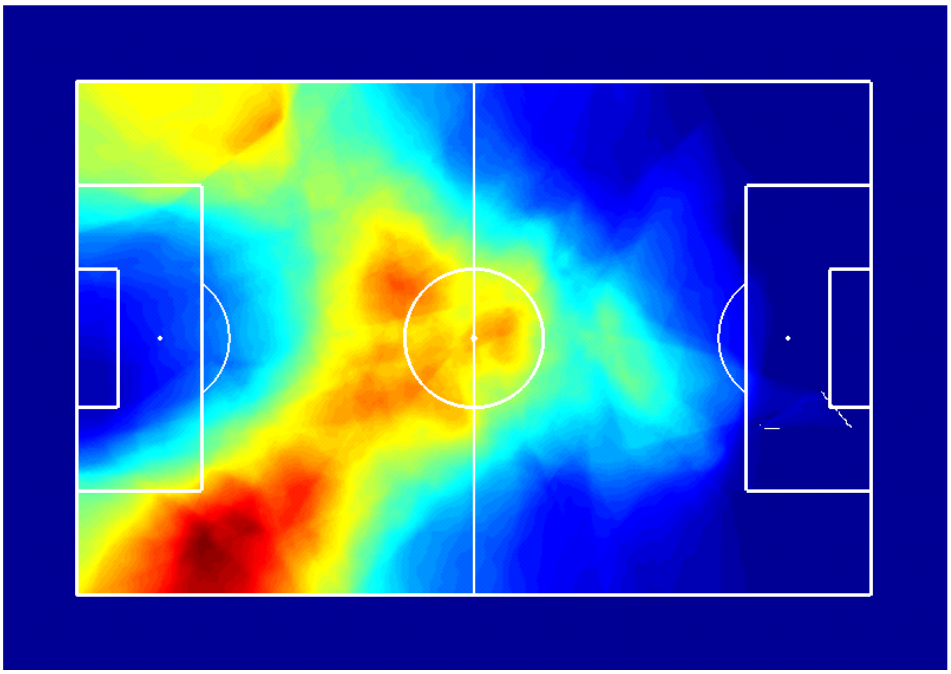

Figura 17 – Exemplo de um gráfico de superfície representado bidimensionalmente, no plano do campo.

A segunda parte foi finalmente a caracterização da área de responsabilidade de cada jogador a partir da matriz utilizada na representação dos mapas de superfície. Essa região foi definida como o contorno topológico (também conhecido como curva de nível) da superfície que representava a região freqüente por pelo menos 60% da máxima freqüência encontrada em uma determinada região do campo (Figura 18). O centróide (ou centro geométrico) do contorno foi calculado para representar a posição do jogador.

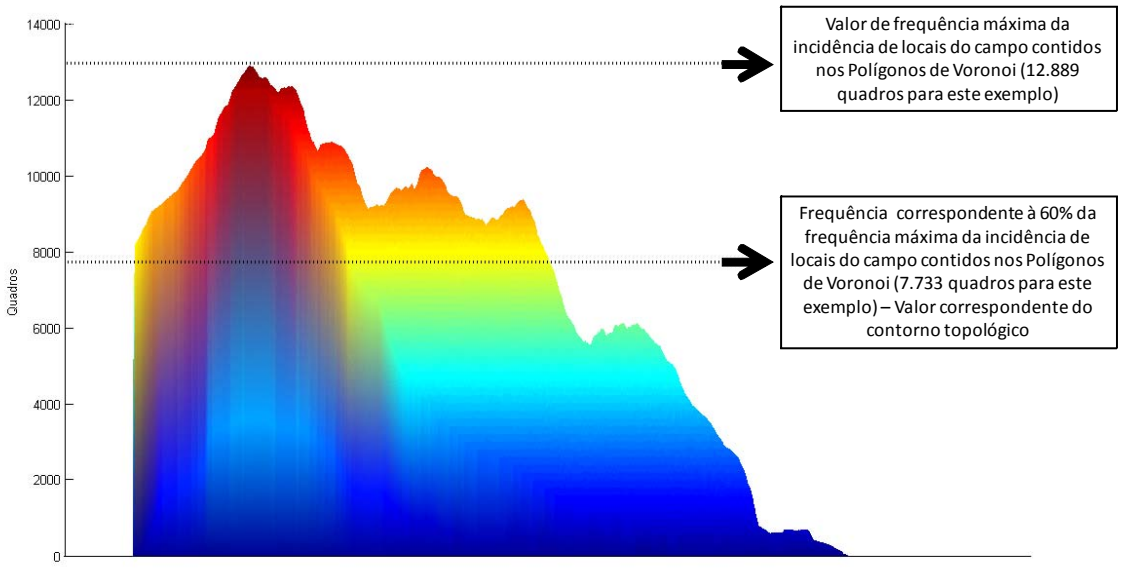

Figura 18 – Demonstração de como foi calculado o contorno para a representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol durante um jogo.

5.8 Análises Estatísticas

Os valores das áreas de responsabilidade (em m²) estão expressos em medianas ± intervalo de confiança (IC), calculado de acordo com as recomendações de McGill, Tukey e Larsen (1978).

Anteriormente as análises, o Jarque-Bera teste verificou a normalidade dos dados. Para todas as análises estatísticas, foi adotado $\alpha < 0.05$. Todas as distribuições foram não-normais ($p < 0.05$), fazendo com que fossem aplicados testes não paramétricos nas análises a seguir.

As comparações das áreas de responsabilidade entre todas as 6 posições táticas no futebol foram realizadas pelo teste Kruskal-Wallis. Quando encontradas diferenças significantes ($p < 0.05$), o teste de Tukey foi utilizado para análise *post hoc*.

Para avaliar a relação entre a área do GK e a soma das áreas dos FW, em cada partida, o coeficiente de correlação de postos de Spearman foi testado.

6 Resultados

6.1 Áreas de responsabilidade dos jogadores

A Tabela 1 mostra as áreas de responsabilidade (m²) encontradas para todos os jogadores expressas em medianas ± IC, durante o 1° e 2° tempo dos 4 jogos analisados.

Na comparação das áreas entre as diferentes posições táticas, os resultados revelaram que todas as posições diferiram entre si. GK apresentaram valores maiores de áreas de responsabilidade, seguidos pelos FW, ED, OM, CD e DM ($p < 0.05$).

Tabela 1 – Áreas de responsabilidade (m²) dos 33 diferentes jogadores em ambos os períodos das 4 partidas analisadas, expressos em medianas ± IC. Os números de 1-8 que acompanham os valores da tabela referem-se a diferenciação de cada jogador pertencente a um determinado grupo tático.

	Match 1		Match 2		Match 3		Match 4	
Players	**1st Half**	**2nd Half**	**1st Half**	**2nd Half**	**1st Half**	**2nd Half**	**1st Half**	**2nd Half**
GK	1277.5 ± 6.9 [1]	1072.3 ± 6.4 [1]	1462.7 ± 7.1 [2]	950.4 ± 6.6 [2]	1107.2 ± 7.5 [2]	1335.8 ± 6.7 [2]	1447.7 ± 7.2 [2]	1338 ± 7.2 [2]
RED	582.3 ± 3.5 [1]	664.6 ± 3.0 [1]	618.8 ± 3.7 [1]	515.5 ± 3.8 [1]	508.8 ± 3.1 [1]	685.1 ± 3.4 [1]	669.9 ± 3.3 [2]	519.9 ± 2.9 [2]
LED	588.4 ± 3.5 [1]	501.9 ± 5.9 [2]	761.1 ± 3.6 [2]	865.8 ± 3.1 [2]	640.9 ± 3.6 [2]	342.3 ± 3.0 [2]	567.7 ± 2.9 [2]	-
CD	364.9 ± 2.1 [1]	285.8 ± 1.9 [1]	386.6 ± 2.4 [1]	370.7 ± 2.3 [1]	460.7 ± 3.0 [1]	309.9 ± 2.0 [1]	451.8 ± 2.8 [1]	438.9 ± 2.6 [1]
	439.3 ± 2.7 [2]	334.1 ± 2.5 [2]	373.4 ± 2.1 [4]	326.8 ± 2.2 [4]	291.8 ± 1.8 [4]	363.9 ± 2.2 [4]	405.0 ± 2.8 [3]	299.0 ± 1.9 [3]
	294.9 ± 1.6 [3]	209.5 ± 1.4 [3]	-	340.7 ± 16.3 [5]	450.2 ± 2.6 [6]	568.6 ± 3.1 [6]	267.9 ± 1.6 [4]	359.8 ± 1.9 [4]
	-	-	-	-	-	-	-	443.9 ± 8.3 [7]
DM	238.5 ± 0.8 [1]	213.4 ± 0.9 [1]	208.5 ± 0.9 [1]	193.9 ± 1.0 [1]	192.0 ± 0.7 [1]	166.6 ± 0.7 [1]	203.6 ± 1.0 [1]	165.8 ± 0.8 [1]
	219.8 ± 1.2 [2]	203.3 ± 82.1 [2]	228.1 ± 1.6 [2]	196.6 ± 1.2 [2]	202.3 ± 1.2 [4]	-	224.8 ± 1.4 [5]	596.0 ± 3.3 [5]
	-	240.4 24.7 [3]	-	-	-	-	-	-
OM	311.9 ± 1.6 [1]	470.1 ± 2.8 [1]	256.0 ± 1.3 [1]	294.1 ± 33.6 [1]	277.5 ± 1.6 [5]	324.2 ± 2.5 [6]	576.1 ± 4.3 [6]	554.5 ± 4.4 [6]
	-	825.0 ± 33.6 [2]	611.9 ± 4.5 [4]	910.2 ± 7.2 [4]	-	-	-	247.9 ± 1.1 [7]
	-	413.5 ± 3.0 [3]	-	-	-	-	-	-
FW	1332.3 ± 8.4 [1]	1523.4 ± 10.7 [1]	599.0 ± 5.5 [1]	1147.3 ± 8.5 [1]	989.7 ± 7.2 [5]	991.9 ± 7.8 [5]	954.9 ± 7.8 [2]	935.7 ± 8.4 [2]
	994.3 ± 4.8 [2]	1197.5 ± 12.8 [2]	793.5 ± 5.3 [3]	638.2 ± 4.6 [2]	1117.7 ± 8.2 [6]	315.6 ± 2.7 [6]	359.1 ± 2.6 [6]	629.6 ± 4.6 [6]
	-	-	-	171.7 ± 8.2 [4]	-	878.4 ± 5.9 [7]	-	723.5 ± 22.8 [7]
	-	-		-	-	225.8 ± 2.0 [8]	-	-

Os coeficientes de correlação (*rho*) entre as áreas dos GK com as áreas dos FW mostraram-se negativos e significantes, quando analisados em cada partida, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – coeficiente de correlação de postos de Spearman entre a soma das áreas de responsabilidade dos FW e dos GK nas 4 partidas. (-) jogadores que não participaram da partida. (*) valores significativos estatisticamente.

FORWARDS SUM AREAS				
	Match 1	**Match 2**	**Match 3**	**Match 4**
GK1	-0.41*	-	-	-
GK2	-	-0.67*	-0.88*	-0.31*

Entretanto, o detalhamento de como as áreas de responsabilidade se comportam durante a partida pode oferecer informações interessantes a respeito da dinâmica do jogo. As Figuras 20 e 21 mostram as áreas dos jogadores a cada 15 minutos durante todo o Jogo 3. Ainda, como o Diagrama de Voronoi permite a visualização de uma estrutura que informa como os jogadores distribuem o campo entre si, estão anexados às Figuras 19 e 20 Diagramas que demonstram 3 instantes de tempo em situações parecidas com aquelas evidenciadas pelas medianas.

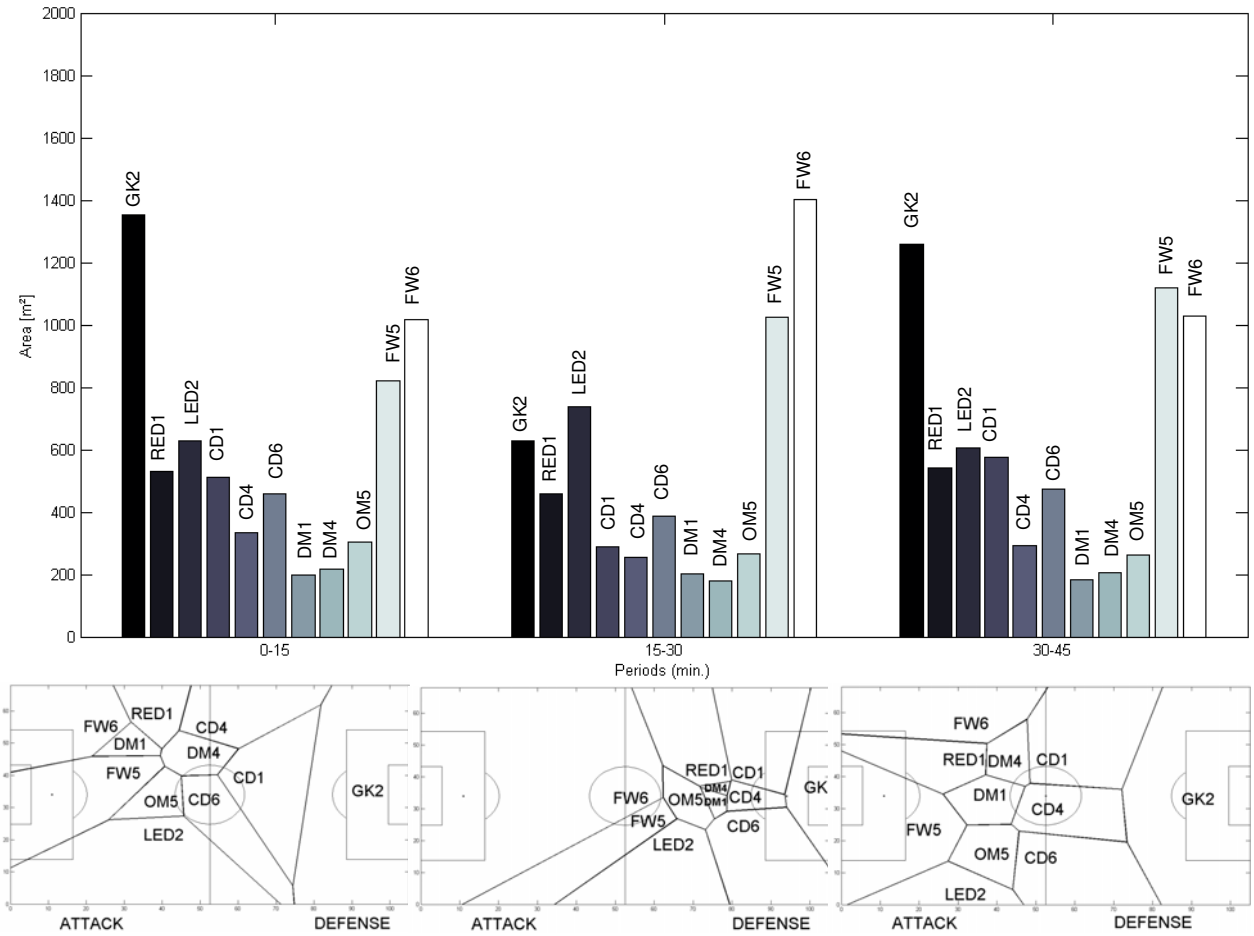

Figura 19 – Medianas das áreas de responsabilidade no 1° Tempo do Jogo 3, a cada 15 minutos. Em anexo estão os Diagramas de Voronoi em 3 instantes de tempo diferentes em situações semelhantes as representadas pelas medianas.

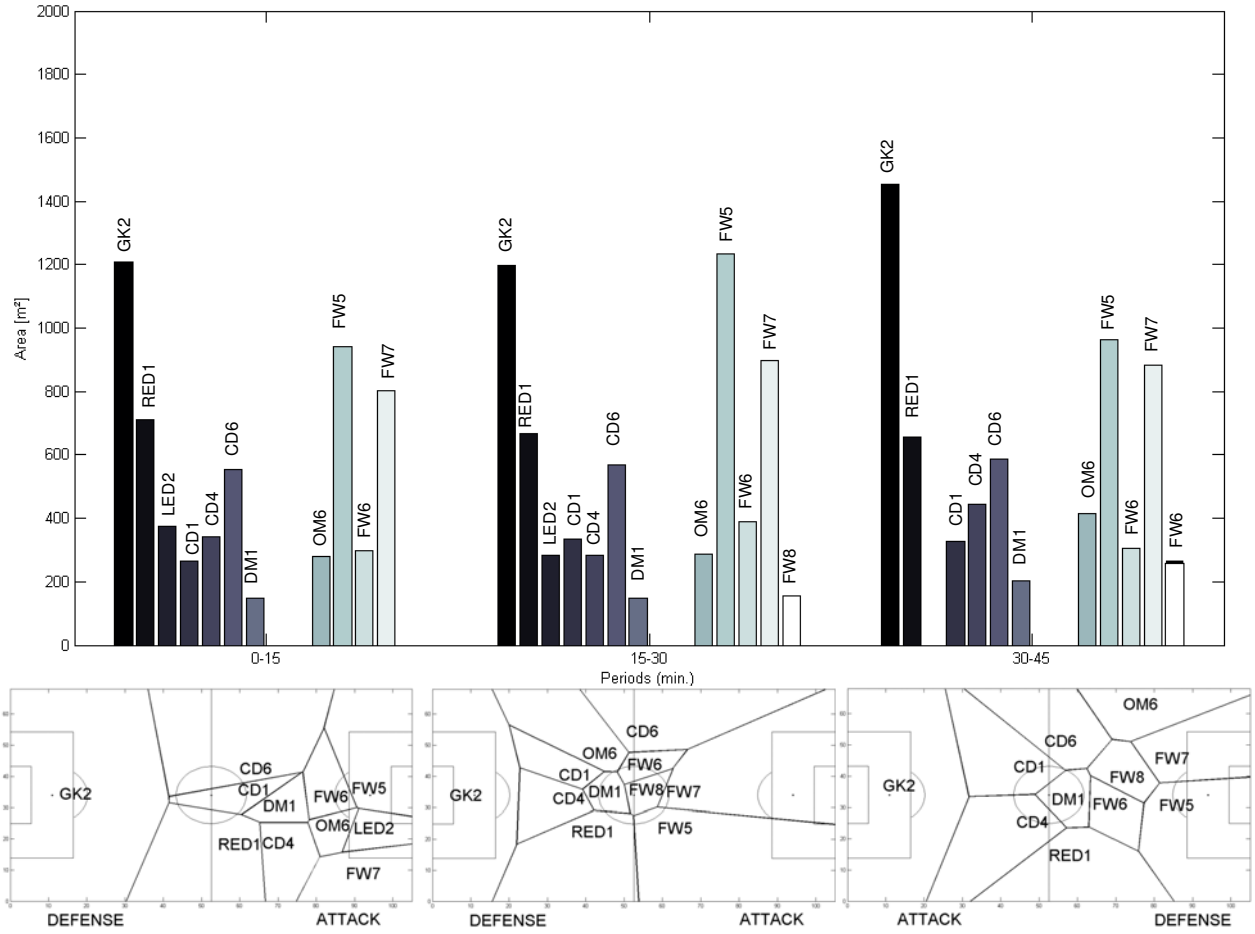

Figura 20 – Medianas das áreas de responsabilidade no 2° Tempo do Jogo 3, a cada 15 minutos. Em anexo estão os Diagramas de Voronoi em 3 instantes de tempo diferentes em situações semelhantes as representadas pelas medianas.

6.2 Mapas de superfície

As figuras a seguir apresentam os mapas de superfície calculados para todos os jogadores de uma equipe, durante o Jogo 2. Está disposta de acordo com a função dos jogadores em campo. As cores mais avermelhadas representam os locais em que mais frequentemente um determinado jogador teve sua área de responsabilidade. Já as cores mais azuladas representam os locais nos quais menos frequentemente um determinado jogador teve sua área de responsabilidade.

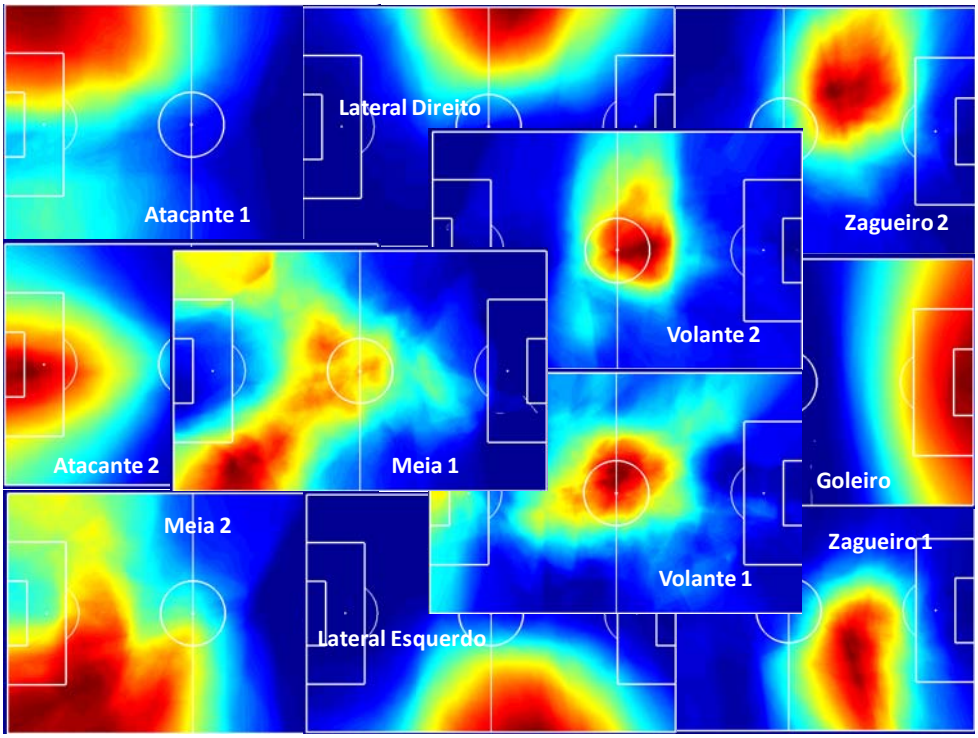

Figura 21 – Mapas de superfície dos 11 jogadores de uma equipe durante o 1° tempo de uma partida.

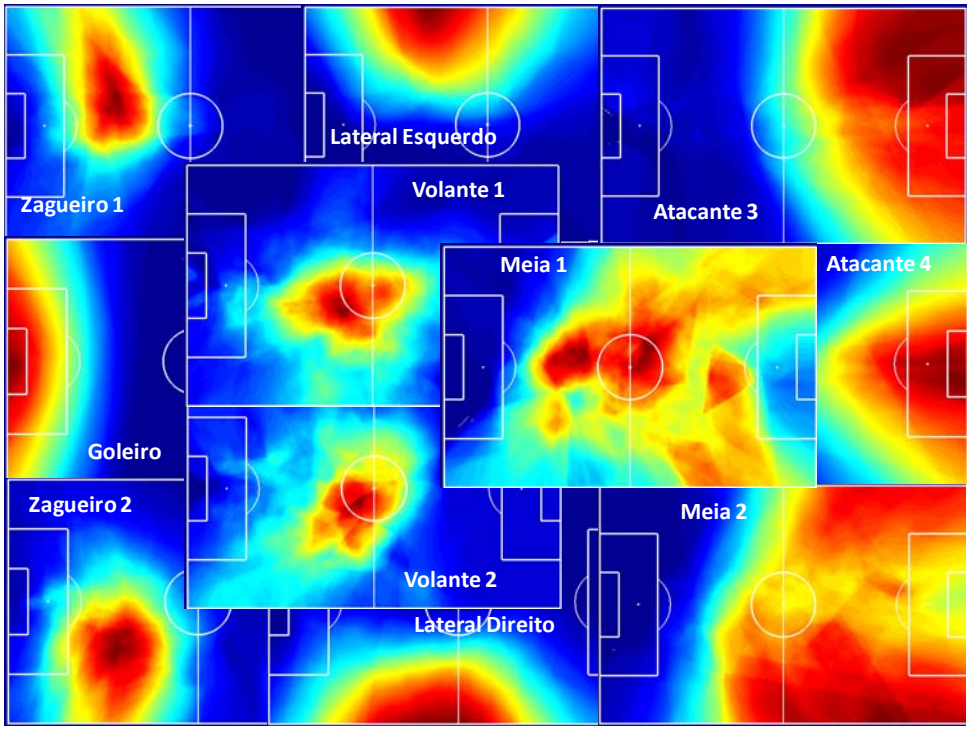

Figura 22 – Mapas de superfície dos 11 jogadores de uma equipe durante o 2° tempo de uma partida.

6.3 Mapas de contorno topológico

As próximas figuras representam os contornos topológicos plotados para caracterizar a área de responsabilidade de todos os jogadores de uma mesma equipe durante toda uma partida.

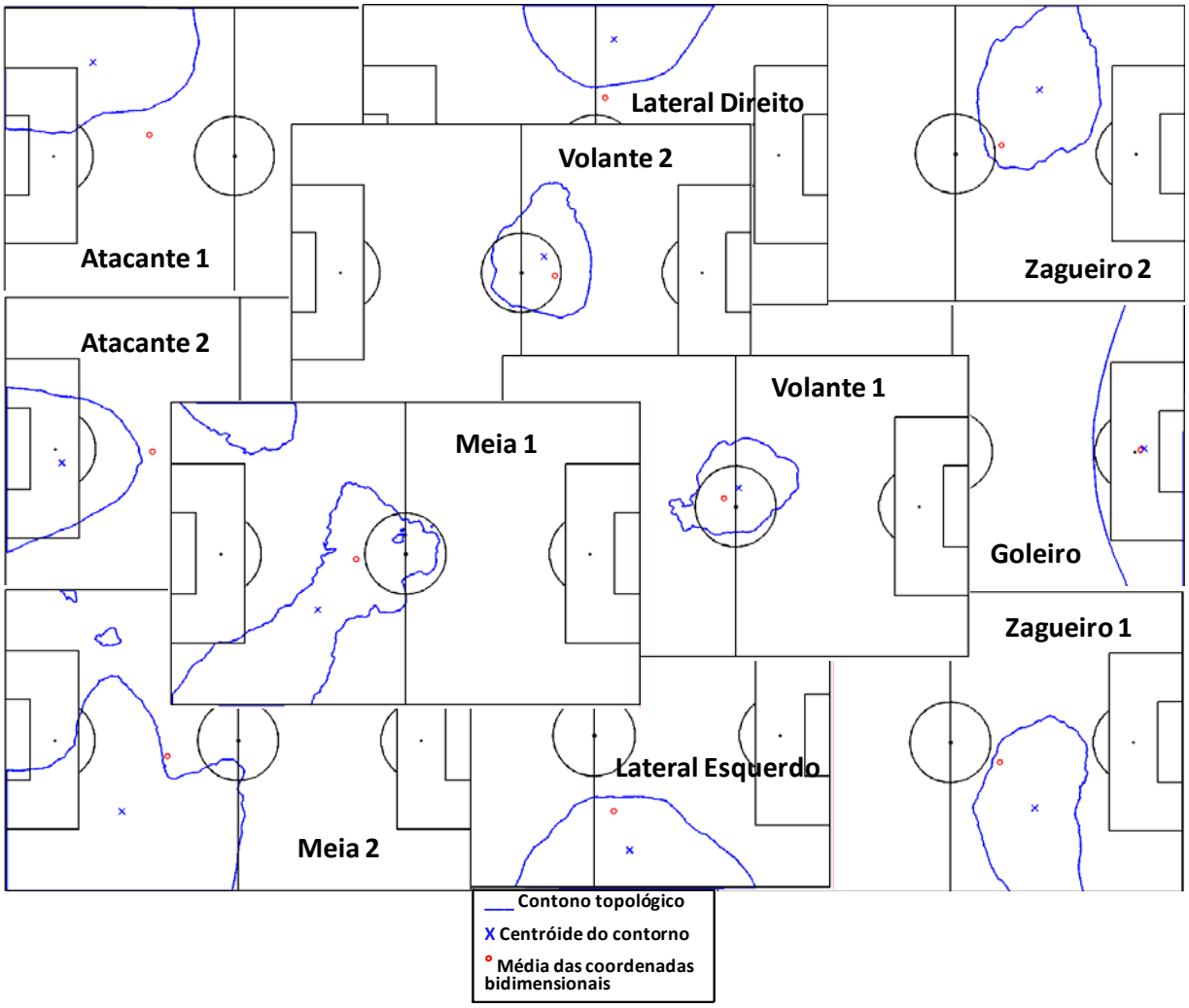

Figura 23 – Contorno topológico para os 11 jogadores de uma equipe no 1° tempo do jogo. Estão ainda representados os centróides encontrados para cada contorno e as médias das coordenadas 2D de cada jogador.

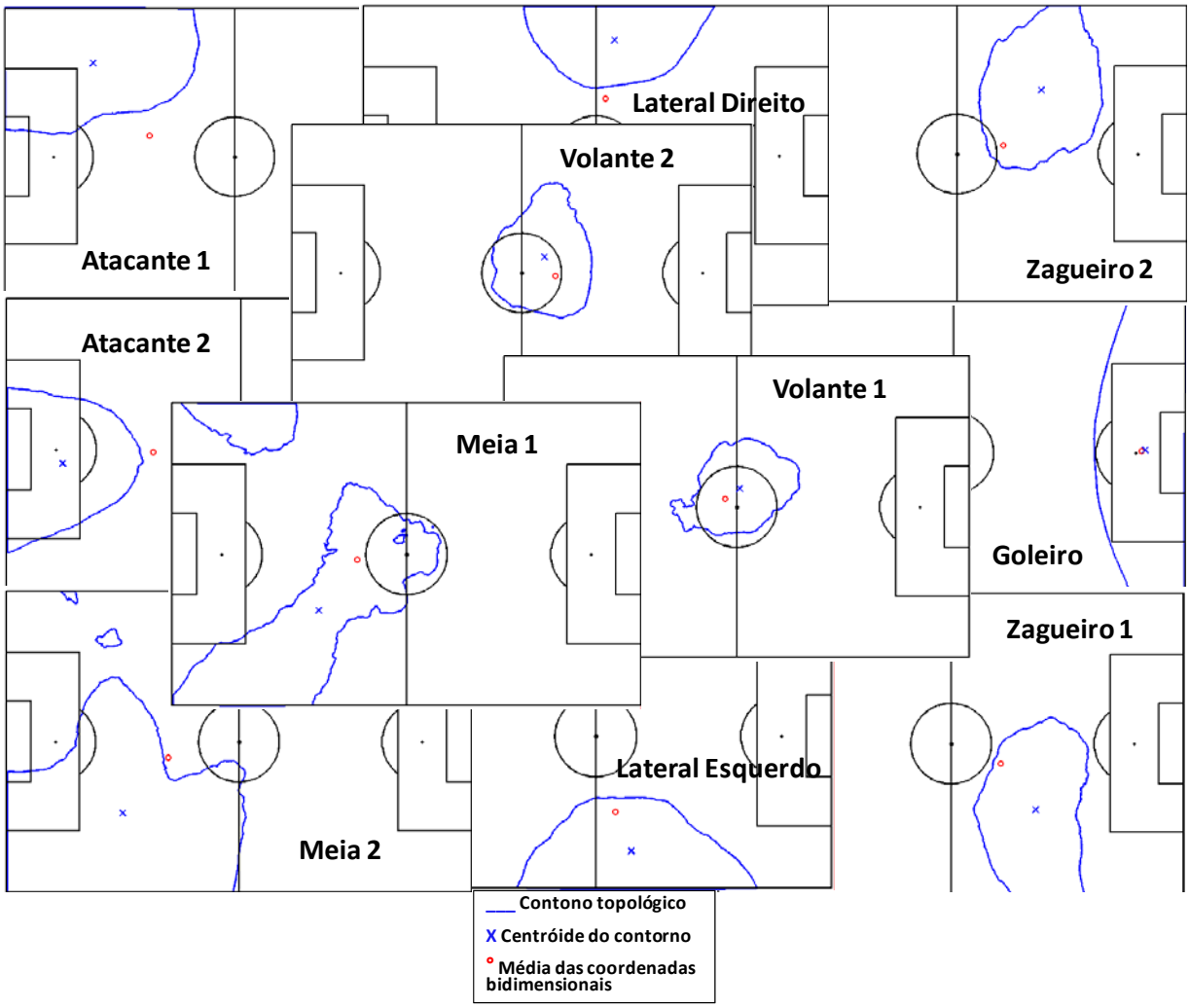

Figura 24 – Contorno topológico para os 11 jogadores de uma equipe no 2° tempo do jogo. Estão ainda representados os centróides encontrados para cada contorno e as médias das coordenadas 2D de cada jogador.

7 Discussão

Já se sabe da importância de entender como o espaço no campo de jogo é aproveitado pelos jogadores, principalmente quando o objeto de estudo é o componente tático no futebol (Reep e Benjamin, 1968; Hughes e Bartlett, 2002). A partir da trajetória e ações técnicas realizadas pelos jogadores, estão apresentados na literatura os mais diferentes tratamentos a fim de identificar estratégias utilizadas pelas equipes em suas movimentações durante partidas.

O presente trabalho propõe um modelo de representação de áreas de responsabilidade de jogadores de futebol em partidas oficiais através da aplicação do Diagrama de Voronoi. Para a aplicação da referida técnica em dados bidimensionais reais dos jogadores ao longo do tempo, dois problemas precisaram ser resolvidos. Os jogadores que se posicionavam próximos às regiões limítrofes do campo apresentavam algumas de suas arestas construídas em direção ao infinito ou então alguns de seus vértices se formaram fora dos limites do campo. Como solução, as coordenadas dos 11 jogadores foram espelhadas ao redor do campo real e esses jogadores que apresentaram esses problemas passaram a apresentar vértices dentro dos limites do campo. Em 100% das situações semelhantes, durante os 4 jogos, esse procedimento foi eficiente, permitindo o cálculo das áreas de cada jogador.

Esse método, especialmente, caracteriza regiões do campo associadas com cada jogador, frente a um critério de distância para partição desse campo. Dessa forma, as regiões mais próximas de um determinado jogador com relação aos seus outros companheiros de equipe se relacionam com a sua região de responsabilidade. Quando o tamanho das áreas de responsabilidade fooi comparado entre as diferentes posições táticas, GK, FW e ED apresentaram os maiores valores. Kim (2004) apresentou resultados similares, apesar de não ser possível uma comparação com os resultados do presente trabalho. O autor mencionado aplica o Diagrama de Voronoi em coordenadas virtuais de 22 jogadores de futebol, o que gerou medidas em *pixels*, ao invés de ser feito para 11 jogadores em situação real de jogo. Além disso, o campo definido pelos autores tinha dimensões de 140x80 *pixels*, o que não correspondem às proporções em metros requisitadas pela FIFA em jogos oficiais.

A interpretação dessas áreas de responsabilidade se torna ainda mais significante quando analisadas por períodos durante as partidas, como a apresentada nas Figuras 19 e 20. Quando GK2 apresentou área aumentada, os FW apresentaram áreas menores, como aconteceu entre 0-15 min e 3-45 min dos dois tempos do Jogo 3. Isso sugere que a equipe jogou mais ofensivamente durante esses momentos da partida. No meio de cada tempo de jogo (15-30 min), os FW apresentaram maiores áreas de responsabilidade comparadas ao GK2, sugerindo dessa forma um jogo mais defensivo nesse momento. Essas mudanças na organização dos jogadores, refletidas nessas situações de ataque e defesa verificadas, são também sustentadas pelos fortes valores de *rho* encontrados para FW e GK nos jogos 2 e 3. Esses achados podem ainda serem complementados pela análise das ilustrações do Diagrama de Voronoi apresentados nas Figuras 20 e 21 as quais dão uma idéia de qual parte do campo de futebol os jogadores apresentam suas respectivas áreas de responsabilidade. Contudo, embora significativos, os jogos 1 e 4 não apresentaram fortes valores de *rho*. Esse fato pode ser atribuído a mudanças nas funções táticas iniciais determinadas pelos técnicos no meio da partida, o que é muito comum no futebol. Mesmo assim, esse tipo de análise ainda pode ser realizado para outras posições, como, por exemplo, entre ED para a verificação da relação das suas áreas durante a partida. Se uma equipe ataca ou é atacada constantemente por apenas um dos lados do campo, provavelmente as áreas do RED e do LED serão diferentes (Kim, 2004).

Para a representação das áreas de responsabilidade de jogadores através de mapas de superfície, foram verificados os locais do campo que com maior frequência estavam contidos nos Polígonos de Voronoi de cada jogador. Para tal, o campo foi dividido em quadrantes de 0.2 metros, conforme explicado anteriormente. A escolha desse valor se deu a partir de dois critérios: tempo de processamento e qualidade dos gráficos. Valores menores do que 0.2 metros aumentavam significativamente o tempo de processamento e não apresentavam gráficos de superfície muito diferentes do valor adotado. Em compensação, valores de quadrantes acima de 0.2 metros reduziam o tempo de processamento, porém apresentavam gráficos com as formas das superfícies menos suaves. Dessa forma, quadrantes de 0.2 mostraram-se os mais adequados de acordo com os critérios levados em consideração.

Os mapas de superfície apresentados nos resultados (Figura 21 e Figura 22) representam essa idéia de áreas de responsabilidade através das regiões do campo associadas aos Polígonos dos jogadores durante o jogo. A grande vantagem da utilização desta ferramenta é a

possibilidade de se visualizar claramente todos os locais do campo contidos nas áreas de responsabilidade dos jogadores e, além disso, a frequência com que isso ocorre. Mas para a caracterização das regiões de responsabilidade de um determinado jogador no campo durante toda a partida, a representação através de contornos topográficos mostrou-se mais clara (Figura 23 e Figura 24).

Os resultados obtidos mostram que os contornos demonstram áreas de responsabilidade contundentes com as funções das principais posições do futebol. O GK apresentou sua área ao redor da sua meta, refletindo a sua função de proteção. Os CD, que são os jogadores que atuam na defesa e cuja principal função é proteger seu próprio gol, apresentaram áreas de responsabilidade nas áreas próximas ao gol. Os ED apresentaram suas áreas de responsabilidade justamente nas áreas laterais do campo, já que são jogadores que atuam pelas laterais do campo. O fato de sua região compreender partes tanto do campo defensivo quanto o ofensivo pode demonstrar suas funções de defesa e ataque. Os DMF atuam logo a frente dos zagueiros, com a função tanto de defender quanto atacar, mas principalmente defender e, como está representado pelo contorno, são jogadores que se posicionam na região central do campo. Os OMF são jogadores de meio campo, que atuam a frente dos volantes, cuja principal função é a de fazer a ligação com o ataque. A partir do contorno, pôde se observar que apresentam áreas de responsabilidade maiores e mais espalhadas. Por fim, os FW são os principais responsáveis por executarem finalizações. Normalmente esses jogadores atuam o mais próximo possível da grande área adversária, como verificado através do contorno, no sentido de facilitar a execução de chutes e cabeceios a gol.

Ainda, além da representação da área de responsabilidade e seu respectivo centróide, estão também representadas as médias das coordenadas bidimensionais de cada jogador durante as partidas. No presente estudo, a posição da média das coordenadas foi diferente, para a maioria dos jogadores, da posição do centróide calculado para cada contorno. Isso demonstra que essas variáveis explicam informações diferentes com relação aos aspectos táticos do futebol. Enquanto que as médias das coordenadas refletem o local em que os jogadores percorreram, o centróide marca o centro da área de responsabilidade de um jogador.

Essas diferenças com relação ao tipo de informação oferecido por metodologias distintas podem ser vistas em trabalhos como o de Menezes et al. (2005). Os autores utilizam a análise por componentes principais como forma de representação das posições dos jogadores. Na

mesma linha, Yue et al.(2008)calculam elipses centradas na média das trajetórias, com seus semi-eixos sendo os desvios padrão nas direções das coordenadas bi-dimensionais dos jogadores. Ambas são maneiras que apresentam, individualmente, as direções de maiores deslocamentos que os jogadores apresentaram durante a partida, porém não fornecem informações a respeito da distribuição das áreas de responsabilidade entre jogadores de uma mesma equipe.

Os resultados gráficos do Diagrama de Voronoi representaram de forma satisfatória as áreas de responsabilidade de todos os jogadores, de acordo com os seus papéis táticos na partida. Uma vez que o futebol é um esporte de invasão (Mitchell, 1996; Hughes e Bartlett, 2002) é importante lembrar que os jogadores podem mudar suas posições alterando suas funções táticas de acordo com a dinâmica do jogo, o que envolve a movimentação adversária e da bola (Yue et al., 2008). Dessa maneira, as áreas de responsabilidade dos jogadores também se modificarão em função desses fatores. Assim, análises qualitativas e quantitativas sobre como essas se modificam durante o jogo podem revelar o quanto estão ocupando do campo e de que forma os jogadores dividem o campo de defesa e de ataque.

Para que técnicos e treinadores possam corrigir e melhorar características táticas de suas equipes, o presente método se mostra importante em revelar estratégias adotadas, considerando a organização dos jogadores no campo. Levando-se em consideração os avanços tecnológicos, sistemas cada vez mais flexíveis permitem a obtenção da posição dos jogadores no campo durante a partida de forma cada vez mais rápida. Associadas ao tipo de análise proposto neste trabalho, aplicações desse método durante as sessões de treinamento permitem a técnicos o controle das áreas de responsabilidade dos jogadores durante eventos específicos do jogo, bem como cobranças de escanteios e faltas realizadas pela equipe adversária. Além disso, com as informações obtidas pelo modelo de representação através do mapa de calor, do contorno topográfico e dos centróides, seja durante a partida ou após, treinadores podem ter melhores condições de avaliar se suas equipes jogaram de acordo com o que foi previamente determinado.

8 Conclusões

O presente trabalho propôs um modelo de representação tática de jogadores de futebol através da distribuição do campo em áreas de responsabilidade entre os jogadores de uma equipe. Para tal, a utilização do Diagrama de Voronoi se mostrou uma técnica eficiente na determinação dessas regiões, uma vez que é tido como uma das mais fundamentais estruturas definidas por um conjunto discreto de pontos. Essa técnica mostrou-se capaz de oferecer informações relevantes, já que permite a visualização de uma estrutura organizacional dos jogadores, o que facilita a compreensão de fenômenos táticos, bem como oferecer dados quantitativas sobre as áreas dos polígonos dos jogadores, já que apresenta sua construção baseada em estruturas de geometria conhecida, como é o caso de polígonos convexos.

O modelo proposto neste estudo surge como uma ferramenta adicional dentro daqueles modelos previamente estabelecidos por pesquisadores, na tentativa de entender aspectos táticos do futebol. Esta abordagem vai em direção de uma compreensão da tática através da determinação das regiões de responsabilidade dos jogadores. Técnicos e treinadores podem dessa maneira obter informações adicionais importantes para a criação de melhores estratégias de posicionamento da sua equipe para uma melhor cobertura do espaço do campo de futebol.

Futuras investigações acerca da interação entre os Diagramas de Voronoi das duas equipes participantes de um jogo, como as intersecções entre os polígonos de jogadores adversários, podem oferecer informações adicionais sobre a dinâmica do jogo. Com isso, podem ser estabelecidas as relações de responsabilidades entre ataque e defesa de duas equipes, fazendo inferência, por exemplo, sobre o comportamento das marcações dentro dos sistemas defensivos no futebol.

Referências

Abdel-Aziz, Y. I. e Karara, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry Illinois, 1971. 1-18.

Aurenhammer, F. Voronoi Diagrams - a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. Computing Surveys, v.23, n.3, Sep, p.345-405. 1991.

Barris, S. e Button, C. A Review of Vision-Based Motion Analysis in Sport. Sports Medicine, v.38, n.12, p.1025-1043. 2008.

Barros, R. M., et al. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. Journal of Sports Science and Medicine, v.6, p.10. 2007.

Borrie, A., Jonsson, G. K. e Magnusson, M. S. Temporal pattern analysis and its applicability in sport: an explanation and exemplar data. Journal of Sports Sciences, v.20, n.10, Oct, p.845-852. 2002.

Carmichael, F., Thomas, D. e Ward, R. Team performance: the case of English Premiership football. Managerial and Decision Economics, v.21, n.1, p.31-45. 2000.

Chan-Hyun, K. Trajectory Analysis for Soccer Players. 2006. 377-381.

Cunha, S. A., Binoto, M. R. e Barros, R. L. M. Análise da variabilidade na medição de posicionamento tático no futebol. Revista Paulista de Educação Física, v.15, n.2, p.111 - 116. 2001.

Dashti, H. T., et al. Dynamic positioning based on voronoi cells (DPVC). In: A. Bredenfeld, A. Jacoff, I. Noda e Y. Takahashi (Ed.). Robocup 2005: Robot Soccer World Cup Ix. Berlin: Springer-Verlag Berlin, v.4020, 2006, p.219-229. (Lecture Notes in Artificial Intelligence)

Duch, J., Waitzman, J. S. e Amaral, L. A. N. Quantifying the Performance of Individual Players in a Team Activity. Plos One, v.5, n.6, Jun 16, p.-. 2010.

Edgecomb, S. J. e Norton, K. I. Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian football. Journal of Sports Science and Medicine, v.9, n.1-2, May, p.25-32. 2006.

Figueroa, P. J., Leite, N. J. e Barros, R. M. L. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. Computer Vision and Image Understanding, v.101, n.2, p.122-135. 2006.

Hughes, M. D. e Bartlett, R. M. The use of performance indicators in performance analysis. Journal of Sports Sciences, v.20, n.10, Oct, p.739-54. 2002.

Kim, S. Voronoi Analysis of a Soccer Game. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, v.9, n.3, p.233-240. 2004.

Kon, H. e Haseyama, M. Players clustering based on graph theory tor tactics analysis purpose in soccer videos. Ieice Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, v.E90a, n.8, Aug, p.1528-1533. 2007.

Lees, A. Tecnique analysis in sports: a critical review. Journal of Sports Sciences, v.20, p.813-828. 2002.

Liebermann, D. G., et al. Advances in the application of information technology to sport performance. Journal of Sports Sciences, v.20, n.10, Oct, p.755-769. 2002.

Mcgarry, T., et al. Sport competition as a dynamical self-organizing system. Journal of Sports Sciences, v.20, n.10, Oct, p.771-781. 2002.

Mcgill, R., Tukey, J. W. e Larsen, W. A. Variations of box plots. The American Statistician, v.32, p.12-16. 1978.

Menezes, R. P., et al. Variabilidade da representação por componentes principais das posições de jogadores de futebol. In: XI Congresso Brasileiro de Biomecânica. João Pessoa, Brazil, 2005.

Misuta, M. S. Rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por videogrametria: validação do método e análise dos resultados. (Dissertação de Mestrado). UNICAMP, Campinas, 2004. 74 p.

Mitchell, S. A. Approaches to Teaching Games: Improving invasion game performance. The Journal of Physical Education, Recreation and Dance, v.2, n.2, p.30-33. 1996.

Moura, F. A. Análise das ações técnicas de jogadores e das estratégias de finalizações no futebol, a partir do *tracking* computacional. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Educação Física, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Rio Claro, 2006. 92 p.

Okabe, A., Boots, B. e Sugihara, K. Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams: John Wiley \& Sons, Inc. 1992. 532 p.

Reep, C. e Benjamin, B. Skill and chance in association football. Journal of the Royal Statistical Society, v.134, p.581-585. 1968.

Santana, J. E., et al. Descrição do desempenho tático de jogadores de futebol através do Diagrama de Voronoi. III Congresso de Ciências do Desporto, II Simpósio Internacional Ciência do Desporto. F. Unicamp. Campinas, SP: Anais do III Congresso de Ciências do Desporto, II Simpósio Internacional Ciência do Desporto 2009.

Szwarcfiter, J. L. Grafos e algoritmos computacionais. Rio de Janeiro: Campus. 1984

Yue, Z., et al. Mathematical Analysis of a Soccer Game. Part I: Individual and Collective Behaviors. Studies in Applied Mathematics, v.121, n.3, Oct, p.223-243. 2008.

ANEXOS

ANEXO A: Rotina criada em ambiente Matlab® para a realização do Diagrama de Voronoi em dados bidimensionais obtidos através do *software* DVideo®.

```
function diagrama(dat, comp, larg)

% Função criada por Juliana Exel Santana em 03/2009
% diagrama(dat, comp, larg)
% Esta função plota o Diagrama de Voronoi em cada instante de tempo do jogo
% para a primeira equipe do arquivo 2D em uma mesma janela.
% Utiliza a função "voronoi.m", já implementada no Matlab.
% Entrada: dat = entre com o arquivo 2D suavizado e corrigido pela função
%          "corrige2d.m"
%          comp = entre com o valor de comprimento do campo de
%          futebol em metros
%          larg = entre com o valor de largura do campo de futebol em
%          metros
% Saída: janela com o Diagrama de Voronoi para a equipe em cada instante
% de tempo.
% Nota 1: para plotar o Diagrama de Voronoi da segunda equipe do arquivo 2D,
% comente a primeira parte desta função e "descomente" a segunda parte.
% Nota 2: é utilizada a função "camposer.m" para o plot do Diagrama
% no campo de futebol com medidas de acordo com o valor de entrada para as
% variáveis comp e larg.

warning off

%% PRIMEIRA PARTE - EQUIPE A

% Separando as coordenadas x e y da equipe:
x1 = dat(:,2:2:29);
y1 = dat(:,3:2:29);

ncol = size(x1,2);

figure

% Construindo e plotando o Diagrama de Voronoi para os jogadores da equipe:

for i=1:length(x1)
    [vxa, vya] = voronoi(x1(i,:), y1(i,:));
    % Plotando o Diagrama no campo:
    camposer([comp larg])
    h = plot(vxa, vya, '-k', x1(i,:), y1(i,:), 'ow', 'LineWidth',2);
    set(h(1:end-1),'xliminclude','off','yliminclude','off');

    % Plotando o número dos jogadores como representação da sua posição no
    % instante de tempo i
    for j = 1:ncol
        text(x1(i,j),y1(i,j),num2str(j), 'color', 'k',
'HorizontalAlignment','center');
    end
    hold off
    pause(0.0001)
```

```
end

%% SEGUNDA PARTE - EQUPE B

% x2 = dat(:,30:2:57);
% y2 = dat(:,31:2:57);
%
% ncol = size(x2,2);
%
% figure
%
% for i=1:length(x2)
%     [vxb, vyb] = voronoi(x2(i,:), y2(i,:));
%     camposer([comp larg])
%     h = plot(vxb, vyb, '-k', x2(i,:), y2(i,:), 'ow', 'LineWidth',2);
%     set(h(1:end-1),'xliminclude','off','yliminclude','off');
%
%     for j = 1:ncol
%         text(x2(i,j),y2(i,j),num2str(j), 'color', 'k',
'HorizontalAlignment','center');
%     end
%     hold off
%     pause(0.001)
% end
% end
```