



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

FABIO GIULIANO CAETANO

**REGIÃO DOMINANTE DE JOGADORES DE FUTEBOL  
DETERMINADA POR UM MODELO PROBABILÍSTICO  
BASEADO EM VARIÁVEIS CINEMÁTICAS INSTANTÂNEAS**

---

Londrina  
2022

FABIO GIULIANO CAETANO

**REGIÃO DOMINANTE DE JOGADORES DE FUTEBOL  
DETERMINADA POR UM MODELO PROBABILÍSTICO  
BASEADO EM VARIÁVEIS CINEMÁTICAS INSTANTÂNEAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Universidade Estadual de Londrina - UEL,  
como requisito parcial para a obtenção do título  
de Doutor em Educação Física.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Arruda Moura

Londrina  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Caetano, Fabio Giuliano.

Região dominante de jogadores de futebol determinada por um modelo probabilístico baseado em variáveis cinemáticas instantâneas / Fabio Giuliano Caetano. - Londrina, 2022.

108 f. : il.

Orientador: Felipe Arruda Moura.

Tese (Doutorado em Educação Física) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Educação Física e Esportes, Programa de Pós-Graduação em Educação Física, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Biomecânica - Tese. 2. Cinemática - Tese. 3. Esporte - Tese. 4. Futebol - Tese. I. Moura, Felipe Arruda. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Educação Física e Esportes. Programa de Pós-Graduação em Educação Física. III. Título.

CDU 796

FABIO GIULIANO CAETANO

**REGIÃO DOMINANTE DE JOGADORES DE FUTEBOL  
DETERMINADA POR UM MODELO PROBABILÍSTICO  
BASEADO EM VARIÁVEIS CINEMÁTICAS INSTANTÂNEAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Educação Física.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Felipe Arruda Moura  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. André Gustavo Pereira de Andrade  
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

---

Prof. Dr. Gibson Moreira Praça  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

---

Prof. Dr. Juliano Dal Pupo  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC

---

Prof. Dr. Milton Shoiti Misuta  
Universidade Estadual de Campinas –  
UNICAMP

Londrina, 21 de setembro de 2022.

Dedico esse trabalho aos meus pais,  
Lucia e Mauro, pelos quais possuo  
gratidão eterna devido a tudo que  
fizeram por mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda minha família que esteve sempre solícita a me ajudar quando necessário, em especial a minha irmã Carolina, meu cunhado Fernando, meu primo Henrique, minha sogra Creusa, meu sogro Eduardo e minha cunhada Karina. Principalmente, minha mãe que sempre me incentivou, apoiou e colaborou de alguma forma em todas as minhas realizações, e meu pai que foi o responsável por transmitir os princípios que fizeram de mim a pessoa que sou hoje.

À minha esposa e eterna companheira Carolina por todo carinho, incentivo, e por estar junto comigo nessa jornada. Sua presença na minha vida provocou mudanças muito importantes, cujas são as maiores responsáveis por todos os frutos que estou colhendo.

À Isabel que esteve presente todos esses anos em casa prestando suporte necessário para todos que vivem ali irem à busca das suas conquistas.

Ao meu orientador e amigo Professor Dr. Felipe Arruda Moura, pelo exemplo de conduta como pessoa, docente e pesquisador. Agradeço pelas oportunidades, confiança e enorme contribuição na minha formação como indivíduo.

Aos colegas do Laboratório de Biomecânica Aplicada pela contribuição na minha formação, convivência e colaboração nos meus projetos.

Ao Professor Dr. Sergio Augusto Cunha pela oportunidade e colaboração nos meus projetos acadêmicos ao longo da minha formação.

Ao Professor Dr. Luiz Eduardo Barreto Martins pelos ensinamentos e conversas inspiradoras nesse breve tempo que estivemos em contato.

Aos Professores Dr. Paulo Régis Caron Ruffino e Dr. Sylvio Barbon Junior pelas contribuições extremamente importantes nesse projeto.

Aos Professores Dr. André Gustavo Pereira de Andrade, Dr. Gibson Moreira Praça, Dr. Juliano Dal Pupo e Dr. Milton Shoiti Misuta pelas contribuições nesse trabalho e etapa importante da minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001".

## RESUMO

CAETANO, Fabio Giuliano. **Região dominante de jogadores de futebol determinada por um modelo probabilístico baseado em variáveis cinemáticas instantâneas**. 2022. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Doutorado em Educação Física – Centro de Educação Física e Esportes, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

Os jogadores de futebol se movem constantemente durante a partida para ocupar diferentes regiões do campo com o intuito de gerar oportunidades para sua equipe e prevenir ações ofensivas dos seus adversários. As regiões dominantes são definidas como regiões do campo onde os jogadores conseguem atingir antes dos demais e normalmente são definidas sem considerar as características cinemáticas do deslocamento dos jogadores, ou negligenciam a possibilidade de haver espaços livres no campo. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi apresentar uma nova abordagem de representação da região dominante de jogadores de futebol baseada em modelos de movimento criados a partir das posições, deslocamentos, velocidades e acelerações instantâneas dos jogadores. A amostra foi constituída por 109 jogadores brasileiros profissionais de futebol analisados durante partidas oficiais, sendo computados aproximadamente 15 milhões de dados de posição registrados através de um sistema de rastreamento automático. Velocidades e acelerações vetoriais instantâneas dos jogadores foram utilizadas para gerar os modelos de movimento. Posteriormente foi computado um modelo de probabilidade através da função de histograma com normalização por função de densidade de probabilidade e por fim, determinadas as regiões dominantes dos jogadores. A determinação das regiões dominantes pelo modelo proposto foi avaliada em janelas de tempo futuro de um, dois e três segundos. As áreas das regiões dominantes determinadas pelo modelo proposto, os espaços livres e regiões de *Voronoi* foram calculadas, bem como os valores de área das regiões dominantes e regiões de *Voronoi* foram comparados. O modelo proposto foi aplicado para determinar a área do jogo, as regiões dominantes das equipes absolutas e relativas à área de jogo durante as partidas considerando o campo todo, as metades e os terços do campo, assim como foi analisada a relação da região dominante relativa das equipes com ações técnicas realizadas. Os valores médios de predições corretas na determinação das regiões dominantes dos jogadores foram 96,56%, 88,64% e 72,31% para as janelas de tempo de um, dois e três segundos, respectivamente. As áreas de região dominante dos jogadores foram inferiores as computadas pelo *Voronoi* com valores medianos de 73 e 171 m<sup>2</sup>, respectivamente. O valor mediano de área dos espaços livres no campo foi 5.551 m<sup>2</sup>, enquanto para área de jogo foi 1.588 m<sup>2</sup> e da região dominante das equipes considerando campo todo de 794 m<sup>2</sup>. Os valores de área da região dominante das equipes foram superiores na metade defensiva do campo em comparação a ofensiva, enquanto na comparação entre os terços do campo, o terço médio apresentou maiores valores, seguido pelo terço defensivo e ofensivo. A área de região dominante relativa das equipes apresentou maiores valores para as equipes mandantes em todas as situações (exceto terço médio do campo), assim como apresentaram relação com melhores indicadores nas ações técnicas. A abordagem proposta mostrou-se mais realista, representando a natureza dinâmica da modalidade, e pode ser uma ferramenta útil para avaliar os

comportamentos táticos relacionados à exploração espaço-temporal dos jogadores e equipes durante as partidas de futebol.

**Palavras-chave:** dados posicionais; diagrama de *Voronoi*; esportes coletivos; rastreamento automático; tática.

## ABSTRACT

CAETANO, Fabio Giuliano. **Football player dominant region determined by a probabilistic model based on instantaneous kinematics**. 2022. 108 p. Final Work for Doctoral Course in Physical Education – Centre of Physical Education and Sports, State University of Londrina, Londrina, 2022.

Football players constantly move during the match to occupy different regions of the pitch to generate opportunities for their team and to prevent offensive actions from the opponents. The dominant regions are defined as regions of the pitch where players can reach before the others and are usually defined without considering the kinematic characteristics of the players' displacement or neglecting the possibility of existing free-spaces in the pitch. Therefore, the objective of this study was to present a novel approach to the analysis of the dominant region of football players based on movement models created from the players' instantaneous positions, displacements, velocities, and accelerations. The sample consisted of 109 Brazilian professional football players analysed during official matches, with approximately 15 million position data recorded using an automatic tracking system. Players' instantaneous vector velocities and accelerations were used to generate the motion models. Subsequently, a probability model was computed using the histogram function with normalization by probability density function and, finally, the dominant regions were determined. The determination of the dominant regions by the proposed model was evaluated in future time windows of one, two and three seconds. The areas of the dominant regions determined by the proposed model, the free-spaces and Voronoi regions were calculated, as well as the area values of the dominant regions and Voronoi regions were compared. The proposed model was applied to determine the playing area, the teams' absolute dominant regions and relative to the playing area during the matches considering the whole pitch, halves, and thirds of the pitch, as well as the relationship of the team's relative dominant region with technical actions performed was analysed. The mean values of correct predictions in the determination of the players' dominant regions were 96.56%, 88.64% and 72.31% for the future time windows of one, two and three seconds, respectively. The players' dominant region areas were lower than those computed by Voronoi with median values of 73 and 171 m<sup>2</sup>, respectively. The median value of the area of free-spaces on the pitch was 5,551 m<sup>2</sup>, while for the playing area it was 1,588 m<sup>2</sup> and the dominant region of the teams considering the whole pitch of 794 m<sup>2</sup>. The area values of the dominant region of the teams were higher in the defensive half of the pitch compared to the offensive, while in the comparison between the thirds of the pitch, the middle third presented higher values, followed by the defensive and offensive thirds. The relative dominant region area of the teams showed higher values for the home teams in all situations (except for the middle third of the pitch), as well as showing a relationship with better indicators in the technical actions. The proposed approach proved to be more realistic, representing the dynamic nature of the modality and can be a useful tool to assess tactical behaviours related to space-time exploration of players and teams during the football matches.

**Keywords:** automatic tracking; positional data; tactics; team sports; Voronoi diagram.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Representação das regiões de <i>Voronoi</i> , conforme o método proposto por Kim (2004).....	28
<b>Figura 2</b> – Representação das regiões dominantes sobrepostas baseadas no diagrama de <i>Voronoi</i> , conforme o método proposto por Fonseca <i>et al.</i> (2013). ....	29
<b>Figura 3</b> – Representação das regiões dominantes denominadas de “ <i>K-regions</i> ”, conforme o método proposto por Filetti <i>et al.</i> (2017).....	30
<b>Figura 4</b> – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento proposto por Taki e Hasegawa (2000).....	32
<b>Figura 5</b> – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento proposto por Fujimura e Sugihara (2005). ....	33
<b>Figura 6</b> – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento probabilístico proposto por Brefeld <i>et al.</i> (2019). ....	36
<b>Figura 7</b> – Ilustração das etapas e procedimentos do presente estudo que foram realizados.....	41
<b>Figura 8</b> – Exemplo de configuração do posicionamento das câmeras. ....	42
<b>Figura 9</b> – Imagens obtidas através de um exemplo de enquadramento das câmeras. ....	43
<b>Figura 10</b> – Exemplo de pontos utilizados como coordenadas de referência para o processo de homografia.....	45
<b>Figura 11</b> – Exemplo de trajetórias dos jogadores identificadas ao longo de uma sequência de imagens. ....	46
<b>Figura 12</b> – Interface do <i>software</i> DVide© utilizada no processo de segmentação, exibindo os algoritmos na parte superior, a imagem original na parte inferior direita, e os <i>blobs</i> obtidos na parte inferior esquerda. ....	47
<b>Figura 13</b> – Representação da construção dos grafos. A partir de uma sequência de imagens (A) criam-se os <i>blobs</i> (B) que foram utilizados para a construção do grafo (C). Cada vértice representa um ou mais <i>blobs</i> (indicado com o número dentro do círculo), ligados por uma aresta.....	49
<b>Figura 14</b> – Interface do <i>software</i> DVide utilizada para o registro das ações	

	técnicas exibindo a sequência de imagens na parte superior, logo abaixo a barra de ações e na parte inferior a lista de registro.....	52
<b>Figura 15</b>	– Fluxograma das etapas de criação dos modelos de movimento.....	54
<b>Figura 16</b>	– Exemplo de posições futuras em que o deslocamento ocorre com velocidade entre 5 e 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s <sup>2</sup> , ângulo de 45° e janela de tempo futuro de um segundo (A) e essas posições futuras após os procedimentos de rotação e translação (B). ....	56
<b>Figura 17</b>	– Exemplo de modelos de movimento em que os deslocamentos ocorrem com velocidades entre 5 e 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s <sup>2</sup> e janela de tempo futuro de um segundo após os procedimentos de rotação e translação aplicados nas posições futuras (A) e esse modelo de movimento após o processo de espelhamento das coordenadas (B).....	57
<b>Figura 18</b>	– Exemplos de modelos de movimento gerados a partir de diferentes valores de velocidade e aceleração. ....	58
<b>Figura 19</b>	– Representação gráfica matricial com as amostras de dados de velocidade e aceleração que foram usadas para criar seus modelos de movimento específicos de acordo com cada intervalo. O sim e não representam as combinações de velocidades e acelerações que foram encontradas e não encontradas, respectivamente.....	59
<b>Figura 20</b>	– Exemplo de modelo de movimento com velocidade de 5 a 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s <sup>2</sup> e janela de tempo futuro de três segundos rotacionado e transladado para atual deslocamento a um instante de tempo (A), probabilidades de o jogador atingir qualquer região do campo calculadas para esse modelo de movimento (B), e o modelo de probabilidade após o processo de suavização (C). ....	60
<b>Figura 21</b>	– Exemplo de regiões dominantes determinadas pelo modelo de movimento para todos os jogadores de duas equipes em um instante de tempo. As posições iniciais são representadas pelos números e direções do deslocamento através dos vetores. ....	61
<b>Figura 22</b>	– Exemplo das regiões de <i>Voronoi</i> determinadas para todos os jogadores de duas equipes em um instante de tempo.....	63

<b>Figura 23</b> – Representação das regiões do campo dividido em metades (A) e terços (B) que serão analisadas as regiões dominantes das equipes.....	66
<b>Figura 24</b> – Diagrama de caixas representando a mediana (barras vermelhas), 25 <sup>o</sup> e 75 <sup>o</sup> percentil (caixas azuis), mínimo e máximo (barras pretas) das áreas das regiões dominantes de cada jogador determinadas pelo nosso modelo de movimento (A) e regiões de <i>Voronoi</i> (B).....	70
<b>Figura 25</b> – Exemplo da representação de região dominante dos jogadores levando em consideração a região disputada, apresentada como a sobreposição da região dominante de dois jogadores e o espaço livre apresentado em branco.....	85

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	– Descrição técnica das equipes e partidas analisadas .....	39
<b>Tabela 2</b>	– Variáveis contextuais das partidas analisadas .....	39
<b>Tabela 3</b>	– Confiabilidade dos resultados das variáveis de desempenho físico dos jogadores após redução da frequência de aquisição .....	64
<b>Tabela 4</b>	– Valores de percentuais de predições corretas (média, desvio padrão e intervalo de confiança) para janela de tempo futuro de um, dois e três segundos. ....	68
<b>Tabela 5</b>	– Valores das áreas (m <sup>2</sup> ) de região dominante dos jogadores determinadas pelo nosso modelo de movimento e regiões de <i>Voronoi</i> (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança). ....	69
<b>Tabela 6</b>	– Valores das áreas (m <sup>2</sup> ) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando o campo todo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança). ....	72
<b>Tabela 7</b>	– Valores das áreas (m <sup>2</sup> ) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando as metades do campo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança). ....	73
<b>Tabela 8</b>	– Valores das áreas (m <sup>2</sup> ) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando os terços do campo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança). ....	75
<b>Tabela 9</b>	– Matriz de correlação entre os valores de região dominante das equipes relativas à área de jogo considerando o campo todo com o número de desarmes sofridos, finalizações ao gol realizadas, passes certos e errados realizados e a posse de bola. ....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

avi	<i>Audio Video Interleave</i>
IFAB	<i>The International Football Association Board</i>
RGB	Red, Green, Blue
DLT	<i>Direct Linear Transformation</i>
T1	Janela de tempo futuro de um segundo
T2	Janela de tempo futuro de dois segundos
T3	Janela de tempo futuro de três segundos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Aceleração
$A$	Área da região
$abs$	Valor absoluto
$c$	Número de elementos da região
$cos$	Cosseno
$H$	Valor crítico determinado para <i>Kruskal Wallis</i>
$i$	Instante de tempo
IC95%	Intervalo de confiança de 95%
$j$	Linhas da matriz
$k$	Colunas da matriz
LI	Limite inferior do intervalo de confiança
LS	Limite superior do intervalo de confiança
$n$	Total de <i>frames</i> analisados
$N$	Total de elementos
P25%	Valor referente ao primeiro quartil
P75%	Valor referente ao terceiro quartil
$P$	Nível de significância estatística
$pf$	Posições futuras
$pfe$	Posições futuras espelhadas
$pr$	Probabilidade
$r$	Coeficiente do tamanho de efeito para <i>Wilcoxon Rank Sum</i>
$\rho$	Coeficiente de correlação de <i>Spearman</i>
$sen$	Seno
$t$	Intervalo de tempo
$\tan^{-1}$	Arco tangente

$v$	Velocidade
$x$	Coordenada na direção longitudinal
$x_1$	Coordenada na direção longitudinal inicial
$y$	Coordenada na direção lateral
$y_1$	Coordenada na direção lateral inicial
$\Theta_d$	Ângulo de deslocamento
$\Theta_r$	Ângulo de rotação
$\eta_H^2$	Coeficiente do tamanho de efeito para <i>Kruskal Wallis</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1	PROBLEMA .....	19
1.2	JUSTIFICATIVA .....	22
1.3	OBJETIVOS.....	25
1.3.1	Objetivo Geral .....	25
1.3.2	Objetivo Específicos.....	25
1.4	HIPÓTESES DE PESQUISA .....	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	26
2.1	FUTEBOL E INTERAÇÕES.....	26
2.1.1	Região Dominante e Relação com Desempenho .....	27
2.1.1.1	Modelo de movimento .....	31
<b>3</b>	<b>MÉTODOS</b> .....	38
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO .....	38
3.2	POPULAÇÃO E AMOSTRA .....	38
3.3	LOCAL .....	39
3.4	INSTRUMENTOS, EQUIPAMENTOS E TAREFA .....	39
3.5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	40
3.5.1	Coletas de Dados.....	41
3.5.1.1	Registro das imagens.....	41
3.5.1.2	Registro das coordenadas .....	43
3.5.1.2.1	<i>Procedimento de calibração</i> .....	44
3.5.1.2.2	<i>Procedimento de rastreamento</i> .....	45
3.5.1.2.3	<i>Procedimento de segmentação</i> .....	46
3.5.1.3	Registro das ações técnicas .....	49
3.5.2	Análise de Dados .....	52
3.5.2.1	Suavização das coordenadas .....	52
3.5.2.2	Janela de tempo futuro.....	52
3.5.2.3	Modelo de movimento .....	53
3.5.2.4	Modelo de probabilidade .....	59
3.5.2.5	Região dominante .....	61
3.5.2.5.1	<i>Avaliação da determinação da região dominante</i> .....	62

3.5.2.6	Região de <i>Voronoi</i> .....	62
3.5.2.7	Aplicação da região dominante .....	63
3.5.2.8	Análise estatística .....	67
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
4.1	PREDIÇÕES CORRETAS NA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE .....	68
4.2	ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DOS JOGADORES E ESPAÇOS LIVRES .....	68
4.3	ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES EM DIFERENTES CONTEXTOS .....	71
4.4	RELAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES COM AÇÕES TÉCNICAS .....	76
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>77</b>
5.1	PREDIÇÕES CORRETAS NA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE .....	77
5.2	ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DOS JOGADORES E ESPAÇOS LIVRES .....	78
5.3	ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES EM DIFERENTES CONTEXTOS .....	80
5.4	RELAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES COM AÇÕES TÉCNICAS .....	81
5.4	PERSPECTIVAS FUTURAS .....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>89</b>
	<b>GLOSSÁRIO</b> .....	<b>96</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>97</b>
	APÊNDICE A – <i>Football player dominant region determined by a novel model based on instantaneous kinematics variables</i> .....	98

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA

O futebol é um esporte coletivo caracterizado como um sistema complexo que possui estruturas de diversos níveis de organização, como por exemplo, as equipes, os grupos de jogadores de diferentes funções táticas e os jogadores como elementos individuais (McGarry *et al.*, 2002). Esse sistema dinâmico possui um comportamento não linear de auto-organização que ocorre a partir das interações de seus elementos (Grehaigne *et al.*, 1997). No campo da praxiologia motora, a modalidade é considerada uma atividade sociomotora que envolve incertezas ambientais e interações entre seus elementos, possuindo relações de cooperação entre colegas de equipe e competição entre os adversários (Parlebas, 2013). Esses conceitos podem ser representados sob a perspectiva ecológica proposta anteriormente por Gibson (2014), na qual podemos considerar que os jogadores possuem um comportamento de percepção das restrições do ambiente ao redor e se adaptam a ele, identificando oportunidades para agir (*affordance*). Durante as partidas de futebol, os jogadores vivenciam um processo de tomada de decisão (percepção-ação) em que eles realizam ações influenciadas por restrições do ambiente (colegas de equipe ou adversários), da tarefa (regras do jogo) e do próprio indivíduo (habilidade técnica), por exemplo (Araújo, Silva, *et al.*, 2014). Davids *et al.* (2005) sugerem que os jogadores de esportes coletivos tomam suas decisões de movimento baseadas em informações de posicionamento ou direção de movimento de outros jogadores desse sistema. Sendo assim, esses conceitos podem elucidar comportamento táticos dos jogadores ou das equipes em suas complexas interações, como por exemplo em sua relação espaço-temporal.

Além disso, Glazier (2010) sugere que analisar os comportamentos individuais pode fornecer informações a respeito do comportamento do grupo como um todo, podendo representar como os jogadores influenciam e são influenciados por todo o sistema dinâmico ao qual eles compõem. Essas relações dinâmicas podem ser elucidadas através da investigação das interações entre os jogadores baseada nas análises das díades, ou seja, entre dois jogadores (Araújo, Diniz, *et al.*, 2014). Recentemente, a interação entre jogadores no futebol tem sido alvo de

estudos que frequentemente utilizam díades constituídas pelos jogadores mais próximos, bem como a distância entre eles como o principal parâmetro para analisá-la (Duarte *et al.*, 2010; Clemente *et al.*, 2013; Ric *et al.*, 2017; Caetano *et al.*, 2019; Caetano *et al.*, 2020). As interações entre os jogadores mais próximos e consequentemente a distância entre eles são conceitos relevantes para a análise da exploração espacial das equipes no futebol porque comumente são utilizadas para computar a região dominante dos jogadores (Rico-Gonzalez *et al.*, 2021).

A região dominante de um jogador é definida como a região do campo onde ele consegue atingir antes que qualquer outro jogador (Taki e Hasegawa, 2000). Essa região dominante associada aos jogadores frequentemente é determinada através do diagrama de *Voronoi* (Rico-Gonzalez *et al.*, 2021). A análise baseada em diagrama de *Voronoi* permite decompor um espaço em células associadas a cada ponto que, no caso do futebol, são respectivamente representados pelo campo de jogo, as regiões dominantes e os jogadores, levando em consideração apenas a posição dos jogadores e a distância entre eles e os jogadores mais próximos (Okabe *et al.*, 1992; Kim, 2004). Essa abordagem já foi utilizada no futebol para determinar a região dominante das equipes no último terço do campo, considerado o terço mais próximo do gol adversário (Rein *et al.*, 2017; Memmert *et al.*, 2019), sendo identificado que um maior controle de espaço por parte das equipes apresenta relação com uma maior probabilidade de vencerem a partida (Rein *et al.*, 2017).

Outra abordagem do diagrama de *Voronoi* que resulta em regiões com características arredondadas (Bhattacharya, 2010) foi utilizada para determinar as regiões dominantes dos jogadores e avaliar sua relação com o desempenho técnico nas ações de passe, sob uma perspectiva ofensiva e defensiva (Filetti *et al.*, 2017). Filetti *et al.* (2017) computaram um índice de comportamento técnico-tático visando representar quando a região dominante de um jogador propiciou oportunidades de passe da sua equipe ou quando restringiu oportunidades da equipe adversária, no qual foi demonstrado que uma maior superioridade nesse índice está relacionada com maiores probabilidades de vitória nas partidas. Entretanto, apesar desses estudos (Filetti *et al.*, 2017; Rein *et al.*, 2017) apresentarem informações a respeito do controle de espaço dos jogadores e suas equipes, bem como demonstrar a relevância dessa variável para o desempenho das equipes, eles utilizam abordagens do diagrama de *Voronoi* em que as regiões

dominantes determinadas são associadas aos jogadores somente porque eles são os mais próximos à elas, promovendo uma perspectiva estática que pode ser representativa apenas para o instante de tempo em questão. Essa limitação do diagrama de *Voronoi* é sugerida no estudo conduzido por Rein *et al.* (2017), no qual eles justificam a aplicação de sua análise somente no último terço do campo porque quando realizada no campo todo, pode gerar regiões dominantes excessivamente grandes associadas a jogadores que estão distantes da ação ofensiva.

A região dominante determinada através do diagrama de *Voronoi* devido a sua natureza estática foi abordada anteriormente no estudo conduzido por Taki e Hasegawa (2000). No estudo, foi proposto o uso de um modelo de movimento baseado em dados de deslocamento dos jogadores, como a direção, velocidade e aceleração para aprimorar as regiões dominantes resultantes e obter resultados mais compatíveis com as capacidades físicas dos jogadores (Taki e Hasegawa, 2000). Além disso, com a proposta da utilização do modelo de movimento para determinação da região dominante, conseqüentemente surge o parâmetro denominado de janela de tempo futuro, representando a variação temporal utilizada para gerar o modelo, que no estudo conduzido por Taki e Hasegawa (2000) representa o intervalo de tempo necessário para o jogador atingir determinada distância. Posteriormente, uma limitação no modelo de aceleração proposto por Taki e Hasegawa (2000), que pode gerar aumento de velocidade infinito pelo fato da aceleração ser tratada como um constante, foi abordada por Fujimura e Sugihara (2005), que propuseram um modelo de movimento baseado em um experimento e adicionando uma força resistiva à aceleração. Esse modelo proposto por foi aplicado por Ueda *et al.* (2014) no futebol para determinar a região dominante dos jogadores e posteriormente das equipes utilizando uma janela de tempo futuro de dois segundos, delimitadas pela área de ocupação das equipes que foi definida como um quadrilátero gerado a partir da posição dos jogadores de linha mais extremos em campo.

Entretanto, comportamentos táticos no futebol, como por exemplo, a distância entre os jogadores, área de ocupação das equipes e as regiões dominantes podem sofrer influências de diversas situações durante as partidas (Low *et al.*, 2020). Dessa forma, recentemente foi desenvolvido um modelo de movimento probabilístico gerado a partir de dados posicionais dos jogadores originados de partidas oficiais com o intuito de determinar as regiões dominantes com ainda mais

realismo (Brefeld *et al.*, 2019). O modelo de movimento probabilístico proposto por Brefeld *et al.* (2019) foi gerado considerando a posição dos jogadores, direção do deslocamento, e a velocidade instantânea discriminada em diferentes faixas para se determinar as regiões dominantes em uma janela de tempo futuro de um segundo, baseadas nas probabilidades de os jogadores alcançarem uma determinada região ao longo do tempo. Nesse estudo, os pesquisadores realizaram uma comparação visual das regiões dominantes resultantes do diagrama de *Voronoi* simples, do modelo de movimento proposto por Taki e Hasegawa (2000), Fujimura e Sugihara (2005), e o modelo probabilístico proposto por eles. Foi sugerido que o modelo probabilístico promove regiões dominantes mais realistas em relação aos demais modelos propostos, uma vez que o diagrama de *Voronoi* simples gera mais superestimação das regiões dominantes.

Apesar desses estudos (Taki e Hasegawa, 2000; Ueda *et al.*, 2014; Brefeld *et al.*, 2019) utilizarem modelos de movimento que podem representar as características do deslocamento humano e o ambiente dinâmico de mudanças de uma partida de futebol, que são negligenciados pela abordagem mais simples do diagrama de *Voronoi*, eles aplicam seus modelos de movimento como uma extensão ou aprimoramento do diagrama de *Voronoi*. Conseqüentemente, esses modelos ainda resultam em uma superestimação das regiões dominantes dos jogadores porque todas as regiões do campo são associadas a algum jogador. Sendo assim, como toda região do campo é determinada como região dominante de algum jogador, não há espaços livres no campo e isso pode levar a interpretações inadequadas sobre as análises do espaço de jogo. Essa limitação das propostas apresentadas baseadas em diagrama de *Voronoi* atribuem áreas dominantes exageradas aos jogadores, que são intuitivamente irrealistas para os jogadores de futebol.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Análises da região dominante dos jogadores de futebol foram realizadas com a sua determinação realizada através do diagrama de *Voronoi* simples (Rein *et al.*, 2017; Memmert *et al.*, 2019), com características arredondadas (Filetti *et al.*, 2017) e extensões baseadas em modelos de movimento (Taki e Hasegawa, 2000; Ueda *et al.*, 2014; Brefeld *et al.*, 2019). Esses estudos trouxeram

valiosas contribuições sobre comportamentos táticos dos jogadores através de informações acerca da exploração espaço-temporal das regiões do campo, bem como demonstraram a relação do controle espaço-temporal dos jogadores ou das equipes com o seu desempenho durante as partidas, sendo apresentadas associações entre maiores valores de região dominante das equipes com maiores probabilidades de vitória durante as partidas (Rein *et al.*, 2017). Uma maior probabilidade de as equipes vencerem as partidas também foi relacionada com a superioridade das equipes em um índice baseado na região dominante dos jogadores (Filetti *et al.*, 2017). Também foi apresentado um aumento da região dominante da equipe atacante no decorrer de uma tentativa ofensiva que resultou em gol (Taki e Hasegawa, 2000) e maiores valores de área dominante das equipes foram relacionados ao sucesso ofensivo em tentativas iniciadas na região central do campo (Ueda *et al.*, 2014).

Dessa forma, esses achados demonstram a relevância da região dominante dos jogadores ou das equipes para o desempenho durante as partidas, bem como os estudos que propuseram modelos de movimento elucidam a importância das variáveis cinemáticas dos jogadores para determinar as suas regiões dominantes (Taki e Hasegawa, 2000; Ueda *et al.*, 2014; Brefeld *et al.*, 2019). Entretanto, esses estudos utilizam janelas de tempo futuro para gerar os modelos de movimento definidas arbitrariamente, o que pode influenciar os resultados obtidos. Assim como destacado por Rico-Gonzalez *et al.* (2021), é necessário cautela na análise de regiões dominantes baseadas em janelas de tempo futuro porque as regiões que os jogadores conseguem atingir não dependem exclusivamente da sua capacidade física, mas também do intervalo de tempo utilizado e outros fatores, como tomadas de decisão dos jogadores que ocorrem durante esse período. Além disso, os autores aplicam seus modelos de movimento como um aperfeiçoamento do diagrama de *Voronoi* e associam toda a área do campo como região dominante de algum jogador, negligenciando a existência de regiões do campo que não são habitadas em certos momentos, possivelmente resultando em regiões associadas como de domínio de um jogador, mesmo ele não sendo capaz de atingi-la em um curto espaço de tempo. Além disso, os estudos reportados falham em não apresentar nenhuma medida de avaliação da determinação das regiões dominantes. Outro ponto a se destacar é que esses modelos de movimento comumente também negligenciam as acelerações instantâneas dos jogadores na determinação das suas

regiões dominantes.

Sendo assim, com base nos pontos apresentados na literatura anteriormente, é possível visualizar as valiosas contribuições desses estudos acerca das análises táticas no futebol baseadas nas regiões dominantes dos jogadores, bem como as limitações que possibilitam identificar possíveis contribuições a serem realizadas nesse tópico. Assim, uma abordagem para criação de modelos de movimento considerando todas as variáveis cinemáticas vetoriais dos jogadores, incluindo aceleração instantânea, pode gerar diversos modelos de movimento representando as características distintas dos deslocamentos que possuem diferentes acelerações. Como por exemplo, deslocamentos com acelerações positivas ou negativas não podem ser enquadrados no mesmo modelo de movimento, porque os jogadores podem atingir diferentes regiões do campo de acordo com esse parâmetro. Além disso, um novo método de determinação da região dominante dos jogadores que considera como espaços livres as regiões do campo onde os jogadores não são capazes de atingir em um intervalo de tempo específico pode promover regiões dominantes mais compatíveis com a capacidade física humana e possibilita visualizar os espaços livres no campo. Além disso, é imperativa a apresentação de valores de avaliação da determinação das regiões dominantes dos jogadores possibilita identificar a confiabilidade da representação proposta. Finalmente, um modelo de movimento baseado nos dados de posições, deslocamentos, velocidades e acelerações instantâneas dos jogadores, bem como a janela de tempo futuro determinada a partir de dados originados de partidas oficiais, pode refletir a exploração espaço-temporal dos jogadores durante situações reais da modalidade. Sendo assim, a partir desse desenvolvimento é interessante aplicar essa abordagem para determinar o controle espaço-temporal das equipes no campo e considerando diferentes partes do campo, bem como analisar sua relação com as ações técnicas realizadas. Revisitando análises realizadas anteriormente, tendo em vista que estudos prévios utilizando outras abordagens de determinação da região dominante apresentaram associação dessa variável com o desempenho técnico das equipes durante as partidas considerando o campo todo ou diferentes partes (Taki e Hasegawa, 2000; Ueda *et al.*, 2014; Filetti *et al.*, 2017; Rein *et al.*, 2017).

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente estudo será apresentar uma nova abordagem de representação da região dominante de jogadores de futebol baseada em modelos de movimento criados a partir das posições, deslocamentos, velocidades e acelerações instantâneas dos jogadores e sua relação com ações técnicas realizadas pelas equipes durante as partidas.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos como metas a serem atingidas ao longo da pesquisa:

- a) Avaliar as predições corretas na determinação da região dominante de jogadores de futebol através do modelo proposto em diferentes janelas de tempo futuro.
- b) Comparar os valores de área das regiões dominantes de jogadores de futebol determinadas através do modelo proposto e as regiões de *Voronoi*.
- c) Aplicar a representação da região dominante dos jogadores para determinação de medidas da região dominante das equipes e verificar sua relação com ações técnicas realizadas.

### 1.4 HIPÓTESES DE PESQUISA

- a) Os valores de predições corretas na determinação da região dominante serão superiores nas janelas de tempo futuro menores em comparação com as maiores.
- b) As áreas resultantes das regiões dominantes determinadas pelo modelo proposto serão menores que as originadas das regiões de *Voronoi*.
- c) As equipes com valores superiores de regiões dominantes apresentarão números superiores nas ações técnicas realizadas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Algumas pesquisas têm voltado a sua atenção para analisar o comportamento dos jogadores na exploração espacial do campo de jogo no futebol e determinar a sua relevância para o desempenho coletivo das equipes. Comumente, as variáveis de espaço dominante (“região dominante”, “região de *Voronoi*”, “zona de controle”) têm sido aplicadas para avaliar o uso do espaço em esportes coletivos (Rico-Gonzalez *et al.*, 2021). Dessa forma, uma busca foi realizada em diferentes bases de dados (*PubMed*, *Science Direct*, *Web of Science*) para identificar artigos publicados até o ano de 2021. A busca foi realizada utilizando os seguintes termos ligados com os operadores “AND” para intergrupos e “OR” para intragrupos. Dois grupos foram criados: (1) “*Football*”, “*Soccer*”; (2) “*Dominant region*”, “*Movement model*”, “*Voronoi*”, “*Zone of control*”.

### 2.1 FUTEBOL E INTERAÇÕES

O futebol é uma modalidade praticada por pessoas de diversos gêneros e idades, sendo considerado o esporte mais popular do mundo (Stolen *et al.*, 2005). Essa popularidade acarreta um alto interesse financeiro e conseqüentemente uma busca por conhecimentos que auxiliem no desempenho dos jogadores e equipes, que por sua vez, faz dessa modalidade alvo de pesquisas de diversas áreas científicas (Reilly e Gilbourne, 2003). A análise do desempenho no futebol é mais complexa quando comparada com modalidades individuais porque ela apresenta contextos individuais referentes aos jogadores, assim como contextos coletivos relacionados as equipes (Reilly, 2007). Sendo assim, o desempenho no futebol é influenciado por diversos fatores e conhecimentos de diferentes áreas, alguns deles inclusive da área de biomecânica (Lees e Nolan, 1998).

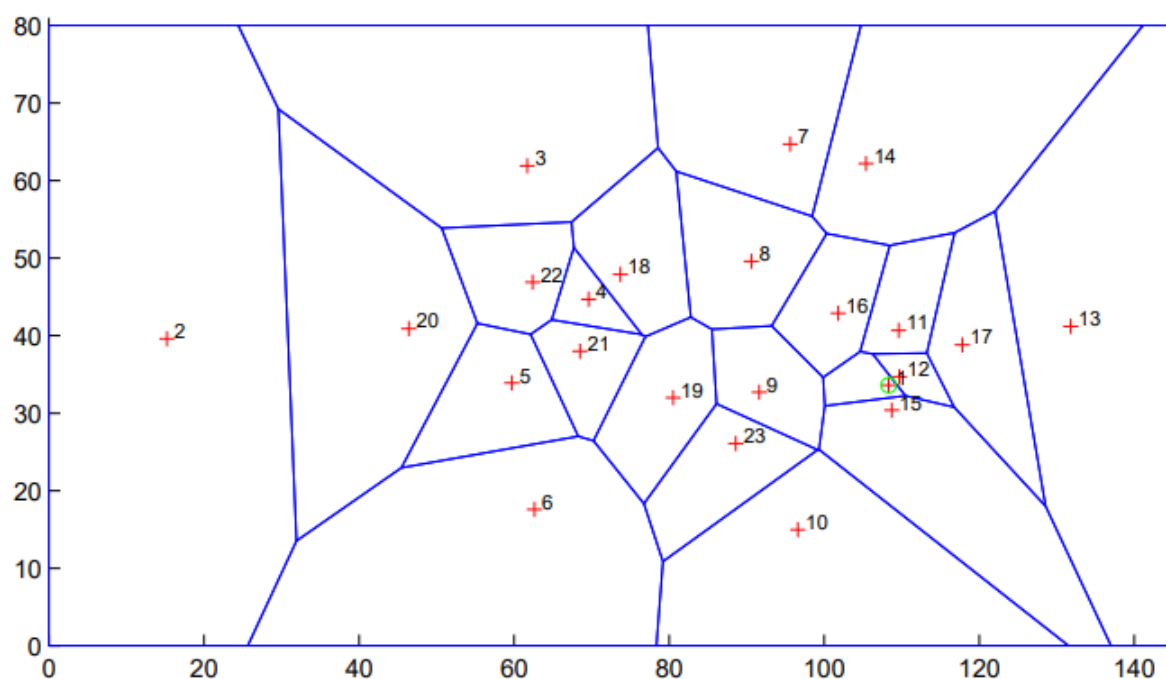
O futebol é um esporte coletivo caracterizado como uma atividade física sociomotora que envolve incertezas ambientais, assim como, interações de cooperação entre os colegas de equipe e competição entre os adversários (Parlebas, 2013). Sendo assim, os jogadores apresentam um comportamento de percepção das restrições do ambiente ao redor e adaptação ao mesmo descrito na abordagem ecológica (Gibson, 2014). As restrições ambientais no futebol podem ser exemplificadas como os colegas de equipe, os adversários, o campo de jogo ou a

bola (Newell, 1986). Dessa forma, os jogadores vivenciam um processo de tomada de decisão denominado de percepção-ação em que eles realizam ações influenciadas nas ações dos demais jogadores, assim como, as suas ações influenciam as tomadas de decisão dos demais jogadores (Araújo, Silva, *et al.*, 2014). Essas interações entre os jogadores são relevantes porque possibilitam avaliar o uso do espaço por parte das equipes e competição por diferentes regiões do campo (Rico-Gonzalez *et al.*, 2021). A competição por diferentes regiões do campo ocorre porque os jogadores se movem constantemente durante a partida com intuito de criar oportunidades para sua equipe e prevenir a criação de oportunidades por parte dos seus adversários. Dessa forma, serão apresentados a seguir estudos que analisaram o domínio de regiões do campo relacionados ao futebol.

### 2.1.1 Região Dominante e Relação com Desempenho

Os estudos que buscaram analisar o domínio de regiões do campo no futebol comumente utilizam o termo “região dominante”, sendo a região dominante do jogador definida como a região do campo onde ele consegue alcançar antes que qualquer outro jogador (Taki e Hasegawa, 2000). Inicialmente, a determinação das regiões dominantes dos jogadores foi proposta utilizando o diagrama de *Voronoi*. Essa técnica possibilita a decomposição de um espaço em células que são associadas com cada ponto (Okabe *et al.*, 1992). No contexto do futebol, o espaço representa o campo, as células são as regiões dominantes e os jogadores são representados pelos pontos. Nesse método as regiões dominantes são determinadas considerando somente a posição dos jogadores. Essas regiões são delimitadas através do cálculo da distância entre cada jogador e os jogadores vizinhos, sendo o limite definido como a metade da distância entre os jogadores vizinhos, conforme exemplificado na Figura 1 (Kim, 2004).

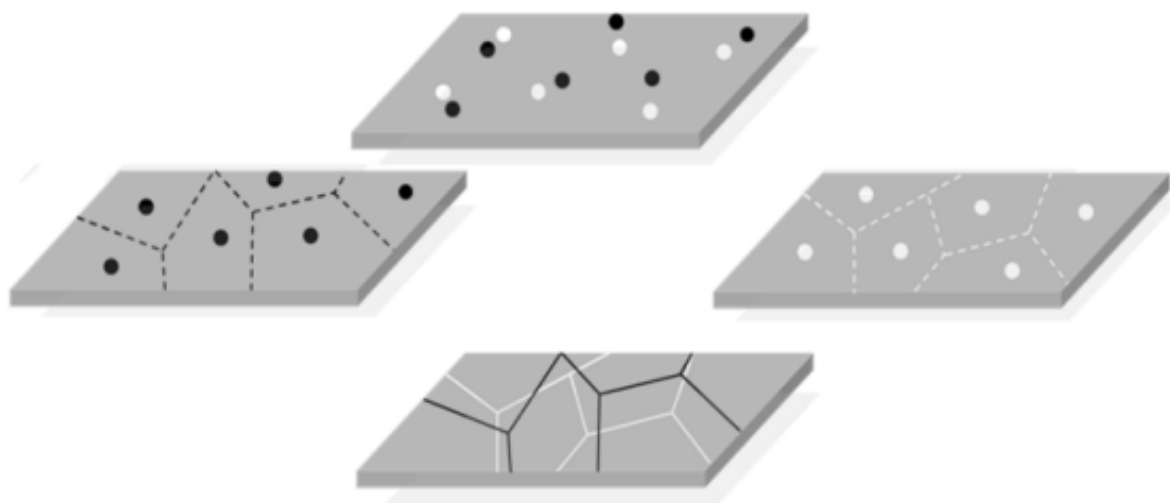
**Figura 1** – Representação das regiões de *Voronoi*, conforme o método proposto por Kim (2004).



Fonte: Kim (2004).

Fonseca *et al.* (2012) utilizaram o diagrama de *Voronoi* para determinar as regiões dominantes de jogadores de futsal durante jogos simulados em área reduzida, reportando que os atacantes apresentaram maiores valores de área da região dominante quando comparado aos defensores. Entretanto, os defensores apresentaram maior variabilidade nos valores de área em comparação aos atacantes. Ainda analisando jogadores de futsal durante jogos simulados em área reduzida, foram determinadas as regiões dominantes separadamente para cada equipe, possibilitando visualizar regiões dominantes sobrepostas entre as equipes, conforme exemplificado na Figura 2 (Fonseca *et al.*, 2013). Nesse estudo foi reportado que maiores valores de área com regiões dominantes sobrepostas representam instantes com mais interações entre os jogadores adversários.

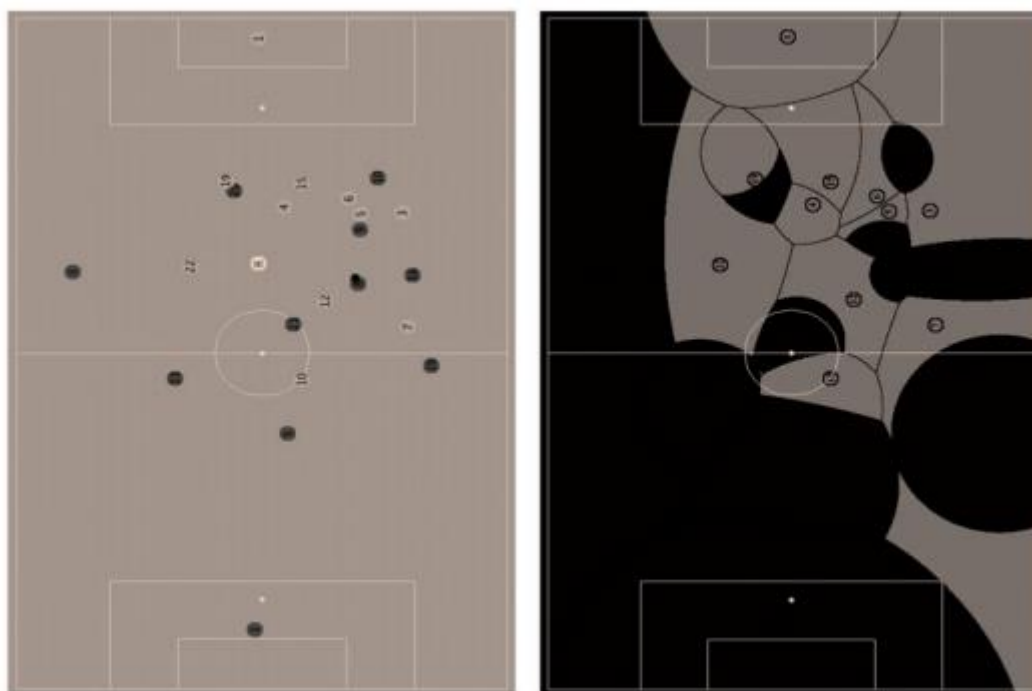
**Figura 2** – Representação das regiões dominantes sobrepostas baseadas no diagrama de *Voronoi*, conforme o método proposto por Fonseca *et al.* (2013).



**Fonte:** Fonseca *et al.* (2013).

Outra abordagem do diagrama de *Voronoi* foi realizada com intuito de maximizar as regiões de *Voronoi* em um conjunto de pontos dentro de um círculo que resulta em regiões com características arredondadas (Bhattacharya, 2010). Filetti *et al.* (2017) utilizaram essa abordagem para determinar as regiões dominantes dos jogadores que eles denominaram de “*K-regions*”, conforme exemplificado na Figura 3, relacionando essas regiões com o desempenho técnico das equipes nas ações de passe. A proposta desse estudo considerou como comportamento técnico-tático positivo de um jogador quando ele apresentou uma região dominante que propiciou uma oportunidade de passe correto da sua equipe no contexto ofensivo. Na perspectiva defensiva o comportamento técnico-tático foi considerado quando a região dominante do jogador limitou as oportunidades de passe da equipe adversária. Além disso, foi computado um índice do comportamento técnico-tático das equipes e demonstrado que maiores diferenças entre as equipes nesse índice apresentaram relação com maiores probabilidades de vitória das equipes durante as partidas.

**Figura 3** – Representação das regiões dominantes denominadas de “*K-regions*”, conforme o método proposto por Filetti *et al.* (2017).



Fonte: Filetti *et al.* (2017).

Rein *et al.* (2017) utilizaram o diagrama de *Voronoi* para determinar a região dominante das equipes no último terço do campo, considerado o terço mais próximo ao gol adversário. Foi identificado o controle de espaço da equipe relativa à área dessa região do campo, sendo o valor do controle de espaço no instante em que o jogador realiza o passe subtraído do valor do controle de espaço no instante em que um companheiro recebeu a bola. Nessa proposta os autores sugerem que valores negativos de controle de espaço representam que os atacantes dominam uma menor região quando o passe é concluído, também foi reportado que o maior controle de espaço apresenta relação com uma maior probabilidade de as equipes vencerem a partida. Memmert *et al.* (2019) aplicaram esse método de quantificação do controle de espaço das equipes no último terço do campo baseado no diagrama de *Voronoi* em partidas simuladas. Foi comparado o comportamento dessa variável entre situações em que as equipes utilizavam diferentes sistemas de jogo, não havendo diferenças significativas entre os sistemas de jogo. Essa abordagem proposta por Rein *et al.* (2017) de limitar a aplicação do diagrama de *Voronoi* no último terço do campo é justificada pelos autores devido ao fato que quando esse método é realizado considerando o campo todo, pode-se gerar grandes regiões

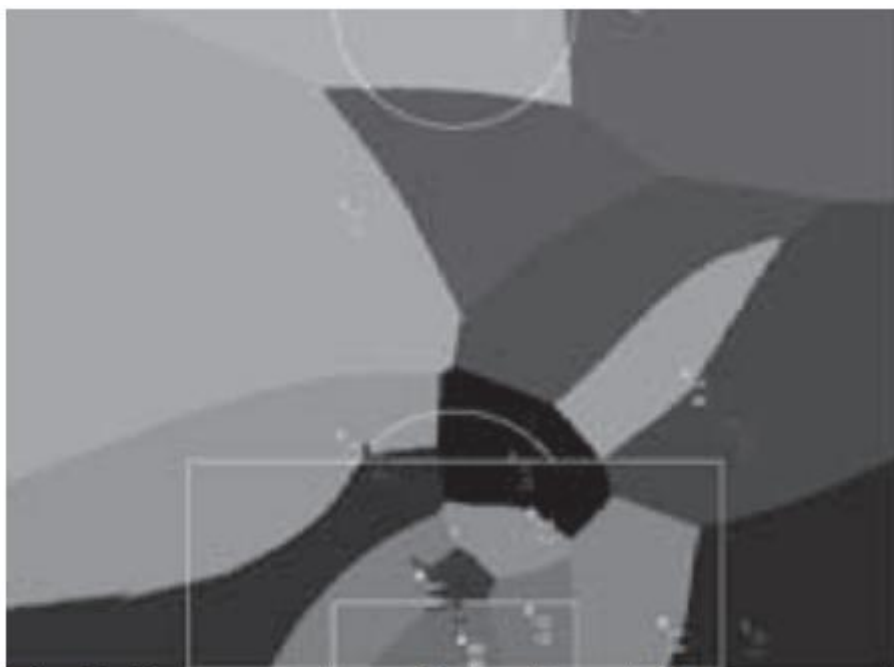
dominantes para jogadores que estão distantes da região onde está ocorrendo a tentativa ofensiva.

#### 2.1.1.1 Modelo de movimento

A limitação do diagrama de *Voronoi* deve-se à sua natureza estática porque as regiões dominantes são determinadas considerando somente a posição dos jogadores e a distância entre eles. Sendo assim, foi proposto o uso de um modelo de movimento definido a partir de dados do deslocamento, como a direção, velocidade e aceleração com o intuito de aperfeiçoar a determinação da região dominante tornando-a mais compatível com as capacidades de deslocamento dos jogadores, conforme exemplificado na Figura 4 (Taki e Hasegawa, 2000). Nesse estudo, os pesquisadores determinaram uma esfera de influência para cada jogador que é modificada de acordo com os vetores da direção do deslocamento e velocidade naquele instante, enquanto o vetor da aceleração foi considerado de igual magnitude para todas as direções, sofrendo uma redução na direção do deslocamento conforme a velocidade aumenta. O conceito proposto entende que os jogadores conseguem acelerar com a mesma força em todas as direções quando estão parados ou se deslocando em baixas velocidades. No entanto, conforme a velocidade aumenta, fica mais difícil acelerar na direção do deslocamento. Posteriormente, as esferas de influência são utilizadas para determinar o parâmetro denominado “*shortest time pattern*” que representa o tempo necessário que cada jogador necessita para se deslocar da sua coordenada atual em  $x$  para uma coordenada específica em  $x$ . Finalmente, as regiões dominantes são determinadas através do diagrama de *Voronoi* com a substituição do parâmetro da distância euclidiana entre os jogadores pelo parâmetro “*shortest time pattern*” proposto por eles. Taki e Hasegawa (2000) também apresentaram aplicações baseadas nas regiões dominantes dos jogadores, como por exemplo, utilizaram as regiões dominantes dos jogadores para determinar a área de região dominante das equipes através da soma das áreas das regiões dominantes dos jogadores pertencentes a cada equipe. A razão entre as áreas das regiões dominantes das equipes ao longo do tempo foi utilizada para avaliar o comportamento coletivo de geração de espaço das equipes na defesa ou no ataque. Utilizando essa análise, foram apresentados resultados experimentais que mostraram aumento da região dominante da equipe

atacante ao longo de uma tentativa de ataque que resultou em gol, assim como foi analisado o trabalho de pressão ao adversário através de uma métrica denominada “*spatial pressure*” que foi determinada considerando a distribuição de regiões dominantes ao redor do jogador, distância da linha de gol e da bola. Além disso, foi proposta a avaliação das ações de passes que foi realizada considerando como um passe de sucesso quando o jogador realizou um passe e a bola atingiu uma região dominada por um colega de equipe.

**Figura 4** – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento proposto por Taki e Hasegawa (2000).



**Fonte:** Taki e Hasegawa (2000).

Posteriormente, Fujimura e Sugihara (2005) propuseram um novo modelo de movimento adicionando uma força resistiva com o intuito de evitar uma limitação do modelo proposto por Taki e Hasegawa (2000) que gera aceleração infinita causada pela aceleração constante. No modelo proposto por Fujimura e Sugihara (2005) a força resistiva à aceleração foi considerada proporcionalmente oposta à velocidade do deslocamento dos jogadores. Além disso, o modelo de movimento gerado foi avaliado através de um experimento realizado com deslocamento de três jogadores em uma janela de tempo futuro de dois segundos, resultando em aceleração de  $1,3 \text{ m/s}^2$  e velocidade máxima de  $7,8 \text{ m/s}$ . Posteriormente, esse modelo de movimento foi utilizado para determinar a região dominante dos jogadores através do diagrama de *Voronoi*, conforme exemplificado

na Figura 5. Além disso, os pesquisadores aplicaram essa análise em uma partida real de hockey para avaliar a contribuição de cada jogador no trabalho coletivo da equipe. Para isso, primeiramente determinaram as regiões dominantes somente dos jogadores defensivos, assumindo que cada jogador defensivo marca algum jogador adversário. Assim, calcularam a área da região dominante dos jogadores e sugerem a ponderação dessa área de acordo com a distância da região para o gol e da bola, denominadas de área dominante ponderada pelo gol e área dominante ponderada pela bola, respectivamente. Esses dois índices são utilizados para representar a importância do posicionamento dos jogadores de forma melhor em comparação a simples área dominante porque é sugerido que regiões distantes da bola ou do gol apresentam baixa densidade de jogadores e resultam em áreas dominantes maiores, mas sem a mesma relevância para o jogo. Fujimura e Sugihara (2005) também propuseram a medida do grau de pressão através do cálculo de tempo mínimo que o jogador defensivo leva para atingir a região atual do jogador ofensivo, bem como a utilização da região dominante de um jogador como uma região de viabilidade de passe para sua equipe. Entretanto, eles sugerem que apesar dessas avaliações contribuírem para o desenvolvimento do esporte, possuem uma implementação difícil e apresentando assim dificuldade de aplicação no contexto prático.

**Figura 5** – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento proposto por Fujimura e Sugihara (2005).



**Fonte:** Fujimura e Sugihara (2005).

Ueda *et al.* (2014) utilizaram o modelo de movimento proposto por Fujimura e Sugihara (2005) para determinar a região dominante dos jogadores através do diagrama de *Voronoi*, posteriormente determinar a região dominante das equipes e analisar sua relação com o desempenho ofensivo das equipes. A região dominante das equipes foi determinada em uma área delimitada que foi denominada de área de ocupação das equipes. Essa área de ocupação foi definida como um quadrilátero formado pela posição dos jogadores mais extremos no campo (excluindo os goleiros), ou seja, os vértices são compostos pelo jogador mais próximo da linha do próprio gol, o jogador mais próximo da linha do gol adversário e o jogador mais próximo de cada linha lateral. Eles analisaram as equipes com e sem posse de bola de acordo com o local que houve a aquisição da posse de bola. Para isso, a área do campo foi dividida em terços de iguais tamanhos no sentido longitudinal (de uma linha do gol a outra), denominados de terço D (mais próximo do próprio gol), terço M (meio do campo) e terço A (mais próximo do gol adversário). Além disso, avaliaram as equipes em relação ao desfecho da tentativa ofensiva, em foi considerado grupo efetivo quando as equipes tiveram sucesso, por exemplo, quando resultou em finalização ao gol e não efetivo quando não houve sucesso na tentativa ofensiva. Finalmente, foram determinadas as áreas das regiões dominantes das equipes no instante em que houve a aquisição da posse de bola. Nesse estudo não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos valores de região dominante das equipes quando houve troca da posse de bola nos terços D e A. Entretanto, foram observadas diferenças no terço M, sendo encontrados valores superiores de área dominante das equipes com posse de bola no grupo efetivo (média: 638; desvio padrão: 250) em comparação ao grupo não efetivo (média: 548; desvio padrão: 201), assim como foram encontrados valores superiores de área dominante das equipes sem posse de bola no grupo efetivo (média: 746; desvio padrão: 209) em comparação ao grupo não efetivo (média: 662; desvio padrão: 187). Os pesquisadores sugerem que a troca de posse de bola no terço central do campo apresenta uma relação causal entre a área dominante das equipes e o seu desempenho ofensivo, na qual, sob uma perspectiva ofensiva, maiores valores de área dominante são relacionados ao sucesso, enquanto na perspectiva defensiva os resultados apontam que menores valores de área dominante estão associados sucesso, ou seja, em prevenir o êxito da equipe ofensiva. Ueda *et al.* (2014) também destacam que pesquisas futuras realizem a análise das regiões dominantes em

outras áreas do campo, bem como avaliem as áreas dessas regiões, já que em seu estudo as regiões dominantes das equipes foram delimitadas pelas áreas de ocupação das equipes. Também devem considerar as propriedades das séries temporais de região dominante, em vez de analisar um ponto discreto dessa medida como foi realizado no estudo conduzido por eles. Além disso, os autores sugerem a aplicação dessa análise com amostras de diferentes idades ou níveis de proficiência porque analisaram somente partidas de equipes universitárias.

Mais recentemente, Brefeld *et al.* (2019) desenvolveram um modelo de movimento probabilístico baseado nos dados posicionais de uma partida oficial como um parâmetro de correção do diagrama de *Voronoi* para determinar as regiões dominantes, denominadas como zona de controle, conforme exemplificado na Figura 6. O modelo de movimento probabilístico proposto considera as posições, ângulo de deslocamento e velocidade dos jogadores para determinar as zonas de controle em uma janela de tempo futuro de um segundo. A estimativa do modelo de movimento probabilístico a partir das posições dos jogadores foi realizada através de um conjunto de parâmetros que foi denominado de trio. Esse trio foi composto por dados de posição inicial e posição final para representar a trajetória do deslocamento, assim como os pontos que os jogadores conseguem atingir em campo considerando sua origem e velocidade. Posteriormente, o trio foi transladado para sua origem estar em zero nas coordenadas  $(x, y)$  e o ângulo rotacionado para estar alinhado com a horizontal. As velocidades utilizadas para gerar os modelos de movimento foram discriminadas em cinco diferentes faixas de velocidade, sendo parado ( $< 1$  km/h), caminhada (1-7 km/h), trote (7-14 km/h), corrida (14-20 km/h) e *sprint* ( $> 20$  km/h). Além disso, foram gerados modelos de movimento considerando as posições de jogo dos atletas, divididas em goleiros, defensores e atacantes meio campistas. Finalmente as probabilidades de os jogadores alcançarem as diferentes regiões ao longo do tempo foram suavizadas através da função estimativa de densidade de *kernel* bidimensional e assim determinadas as zonas de controle. Nesse estudo, os pesquisadores determinaram as regiões dominantes dos jogadores no mesmo instante de tempo utilizando o diagrama de *Voronoi* simples, o modelo de movimento proposto por Taki e Hasegawa (2000), modelo de movimento proposto por Fujimura e Sugihara (2005), assim como o modelo probabilístico proposto por eles para comparação visual das regiões dominantes resultantes. Nessa comparação, eles sugerem que o modelo probabilístico promove zonas de controle mais realistas em

relação as demais propostas, sendo o diagrama de *Voronoi* simples a proposta que gera mais superestimação das regiões dominantes. Também destacam que as propostas baseadas em modelos de movimento contêm suposições demasiadamente simplificadas e somente o modelo de movimento probabilístico apresenta resultados que estão alinhados com os movimentos e distâncias dos jogadores. Além disso, os autores destacam que as diferentes posições de jogo apresentam particularidades enquanto as características dos deslocamentos e conseqüentemente necessidades específicas para gerar modelos de movimento. Mas sugerem que são obtidos resultados satisfatórios na geração de modelos de movimento para os jogadores de linha com dados posicionais obtidos somente em uma partida, como foi o caso no estudo conduzido por eles. Entretanto, os goleiros geralmente estão se deslocando em baixa velocidade durante a partida, o que ocasiona em poucas amostras de valores mais altos de velocidade inicial. Finalmente, Brefeld *et al.* (2019) sugerem que modelos de movimento mais realistas podem contribuir para as análises de região dominante, bem como para a avaliação da influência da região dominante dos jogadores nas regiões controladas pela sua equipe.

**Figura 6** – Representação das regiões dominantes baseadas no modelo de movimento probabilístico proposto por Brefeld *et al.* (2019).



Fonte: Brefeld *et al.* (2019).

Na busca por preencher parte desta lacuna ainda presente na literatura, o presente estudo tem como foco o desenvolvimento de uma nova abordagem de determinação da região dominante de jogadores de futebol baseada em probabilidades computadas através de modelos de movimento criados a partir das posições, deslocamentos, velocidades e acelerações instantâneas dos jogadores.

### 3 MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Esse estudo foi constituído por uma pesquisa com delineamento transversal, sendo utilizada uma análise descritiva comparativa de natureza aplicada.

#### 3.2 POPULAÇÃO E AMOSTRA

A população do presente estudo é de jogadores brasileiros profissionais de futebol de diferentes níveis de competição. Dessa forma, amostra foi constituída, por conveniência, por 109 jogadores do sexo masculino, profissionais de futebol pertencentes a equipes que disputaram uma competição de nível regional. O número de jogadores analisados consiste no somatório de todos os jogadores que participaram das partidas independente do seu tempo de participação, inclusive os envolvidos em substituições durante as partidas. Foram analisadas quatro partidas do campeonato Paulista Série A-2 de 2014 realizadas de acordo com as regras da The International Football Association Board (2014), em um estádio oficial com campo de grama natural em dimensões aproximadas de 105 x 68 m. Esse estudo foi conduzido em acordo com as recomendações éticas da Declaração de *Helsinki*, o termo de consentimento foi obtido para coleta de dados dos jogadores e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Campinas de Ciências Médicas (Protocolo #299797418.2.0000.5404). As descrições técnicas das partidas analisadas nesse estudo podem ser visualizadas na Tabela 1 e as variáveis contextuais são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 1** – Descrição técnica das equipes e partidas analisadas.

Partida	Equipes	Sistema de jogo	Resultado da partida	Classificação final
1 <sup>a</sup>	Time 1	4-4-2	1	1 <sup>o</sup> ao 4 <sup>o</sup>
	Time 2	3-5-2	0	1 <sup>o</sup> ao 4 <sup>o</sup>
2 <sup>a</sup>	Time 1	4-3-3	1	1 <sup>o</sup> ao 4 <sup>o</sup>
	Time 3	4-4-2	0	17 <sup>o</sup> ao 20 <sup>o</sup>
3 <sup>a</sup>	Time 1	4-3-3	2	1 <sup>o</sup> ao 4 <sup>o</sup>
	Time 4	4-4-2	1	13 <sup>o</sup> ao 16 <sup>o</sup>
4 <sup>a</sup>	Time 1	4-3-3	3	1 <sup>o</sup> ao 4 <sup>o</sup>
	Time 25	4-4-2	1	5 <sup>o</sup> ao 8 <sup>o</sup>

Fonte: O próprio autor.

**Tabela 2** – Variáveis contextuais das partidas analisadas.

Partida	Intervalo entre partidas	Período	Temperatura ambiente	Humidade relativa do ar
1 <sup>a</sup>	96 h	Noite	35,2 °C	35%
2 <sup>a</sup>	72 h	Noite	34,8 °C	34%
3 <sup>a</sup>	96 h	Noite	23,2 °C	86%
4 <sup>a</sup>	72 h	Manhã	26,4 °C	62%

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia—INMET—Brasil.

### 3.3 LOCAL

Os procedimentos de registro das imagens e medidas de pontos específicos do campo ocorreram no Estádio Moisés Lucarelli, na cidade de Campinas, estado de São Paulo, Brasil. As análises dos dados foram realizadas no Laboratório de Biomecânica Aplicada da Universidade Estadual de Londrina, na cidade de Londrina, estado do Paraná, Brasil.

### 3.4 INSTRUMENTOS, EQUIPAMENTOS E TAREFAS

A aquisição das imagens das partidas foi realizada utilizando de quatro câmeras digitais da marca CASIO®, modelo EX-F1, com frequência de

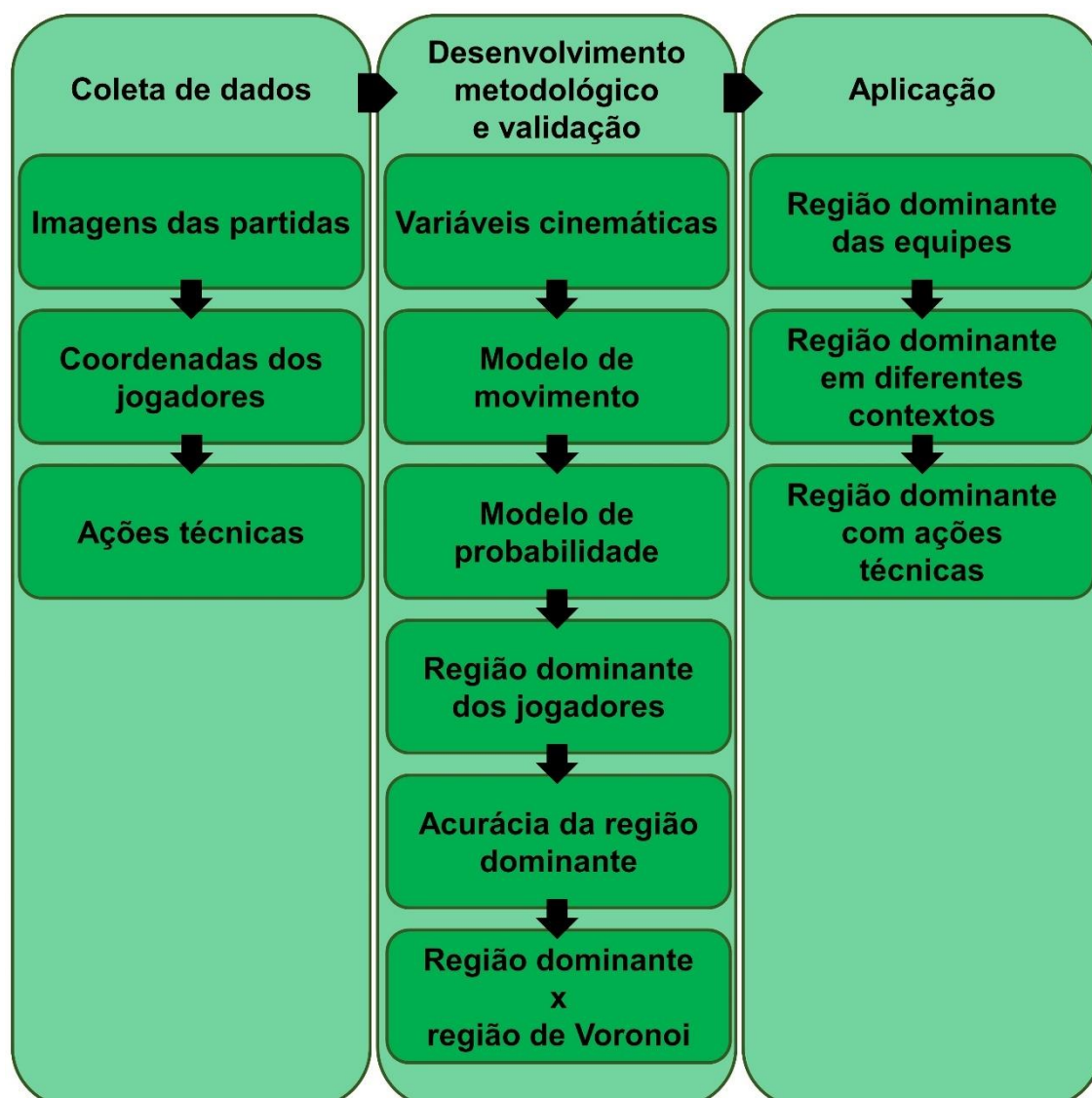
aquisição de 30 Hz. Uma trena manual de fibra de vidro com escala de um milímetro foi utilizada para medir as distâncias entre pontos específicos dos campos de jogo. Os processamentos das imagens e análise dos dados foram realizados em computadores pessoais. O *software* DVideo©, versão 6.02 foi utilizado para registrar a posição dos jogadores em função do tempo e as ações técnicas realizadas durante as partidas. As análises dos dados, bem como as análises estatísticas foram realizadas no *software* MATLAB®, versão R2019a.

### 3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A Figura 7 apresenta as etapas e procedimentos do presente estudo que foram realizados. Imagens de partidas oficiais de futebol foram registradas por meio de câmeras digitais. Posteriormente, esses vídeos foram transferidos para o computador e o processo de sincronização foi realizado. Após a sincronização, foram obtidas as informações de posição dos jogadores em função do tempo através do procedimento de rastreamento, assim como as ações técnicas realizadas pelos jogadores foram identificadas.

Metodologicamente, os modelos de movimento para diferentes combinações de velocidade e aceleração foram gerados a partir de variáveis cinemáticas instantâneas dos jogadores de três partidas (1ª a 3ª partida). Posteriormente, no primeiro tempo de uma partida (4ª partida) as características dos deslocamentos dos jogadores foram identificadas, sendo reconhecido o respectivo modelo de movimento e calculado os modelos de probabilidade em cada instante de tempo. Em seguida, foram determinadas as regiões dominantes dos jogadores nesses instantes e avaliadas as previsões corretas, bem como determinado os espaços livres no campo de jogo e a área de jogo. Finalmente, a abordagem proposta foi aplicada em todas as partidas (1ª a 4ª partida) e as regiões dominantes das equipes foram determinadas em diferentes regiões do campo, assim como a região dominante das equipes relativa à área de jogo e avaliada sua relação com o número de ações técnicas realizadas. Todas estas etapas são descritas em detalhes, conforme a seguir.

**Figura 7** – Ilustração das etapas e procedimentos do presente estudo que foram realizados.



Fonte: O próprio autor.

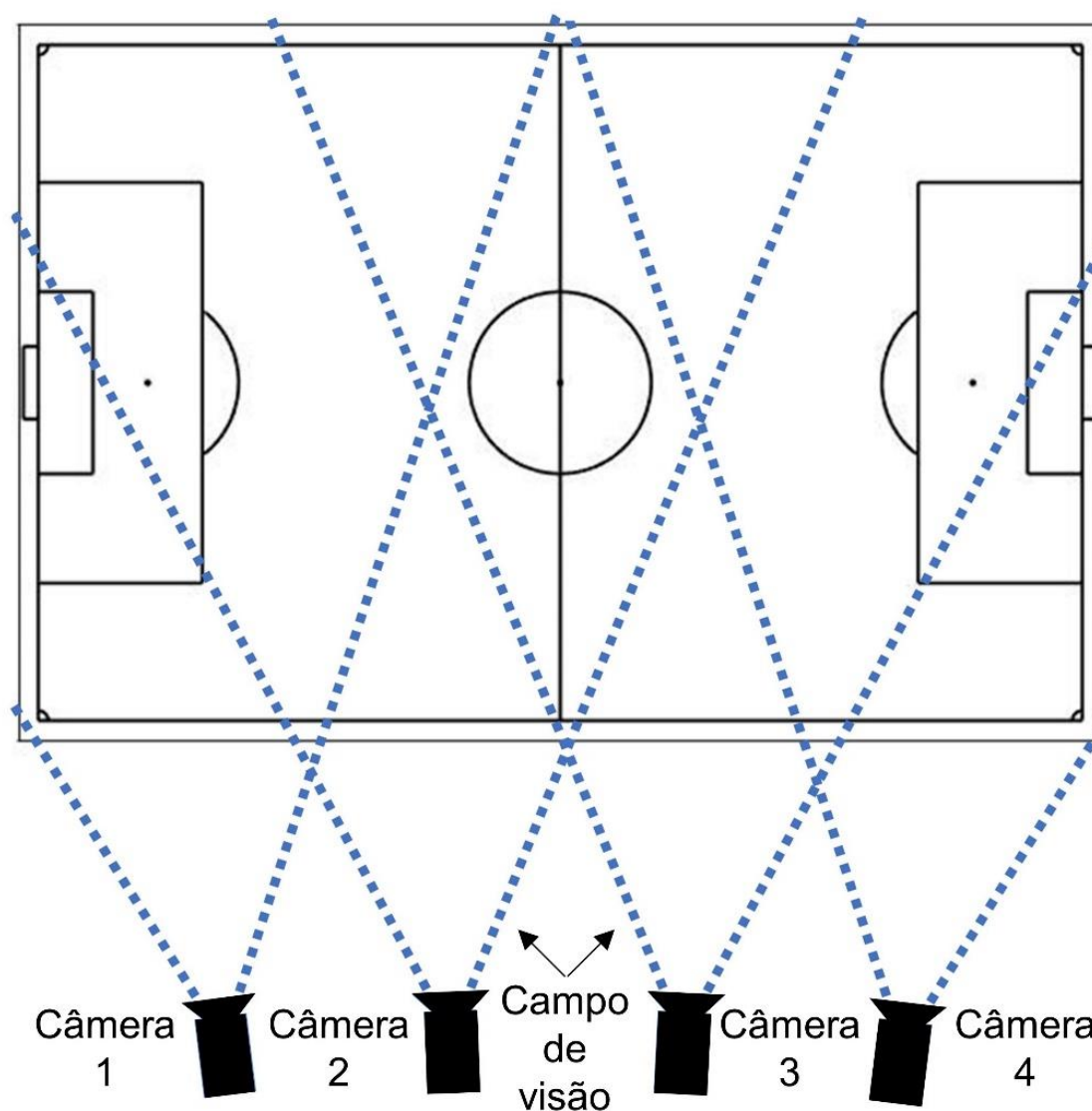
### 3.5.1 Coleta de Dados

#### 3.5.1.1 Registro das imagens

As imagens das partidas foram registradas através de quatro câmeras digitais posicionadas em pontos elevados do estádio onde permaneceram fixas do início ao fim do jogo (Figura 8). Cada câmera enquadrava aproximadamente um quarto do campo, com regiões de sobreposição entre elas (Figura 9). Após o

término das partidas, essas imagens foram transferidas para o computador na extensão “.avi” (*Audio Video Interleave*) com resolução de 480 por 640 *pixels*. Posteriormente, foi realizado o processo de sincronização das câmeras que consiste em eliminar a defasagem temporal entre os sinais de vídeos das diferentes câmeras. Esse processo foi realizado através da identificação de eventos específicos como, por exemplo, um chute que ocorreu nas regiões de sobreposição, sendo identificado o instante de ocorrência desse evento e computada a defasagem temporal entre os sinais de vídeos. Por fim, os valores de instantes iniciais dos vídeos foram inseridos no *software* DVideo© considerando a defasagem temporal entre os sinais e subsequentemente o sistema mantém automaticamente as imagens das câmeras sincronizadas.

**Figura 8** – Exemplo de configuração do posicionamento das câmeras.



Fonte: O próprio autor.

**Figura 9** – Imagens obtidas através de um exemplo de enquadramento das câmeras.



**Fonte:** Caetano (2016).

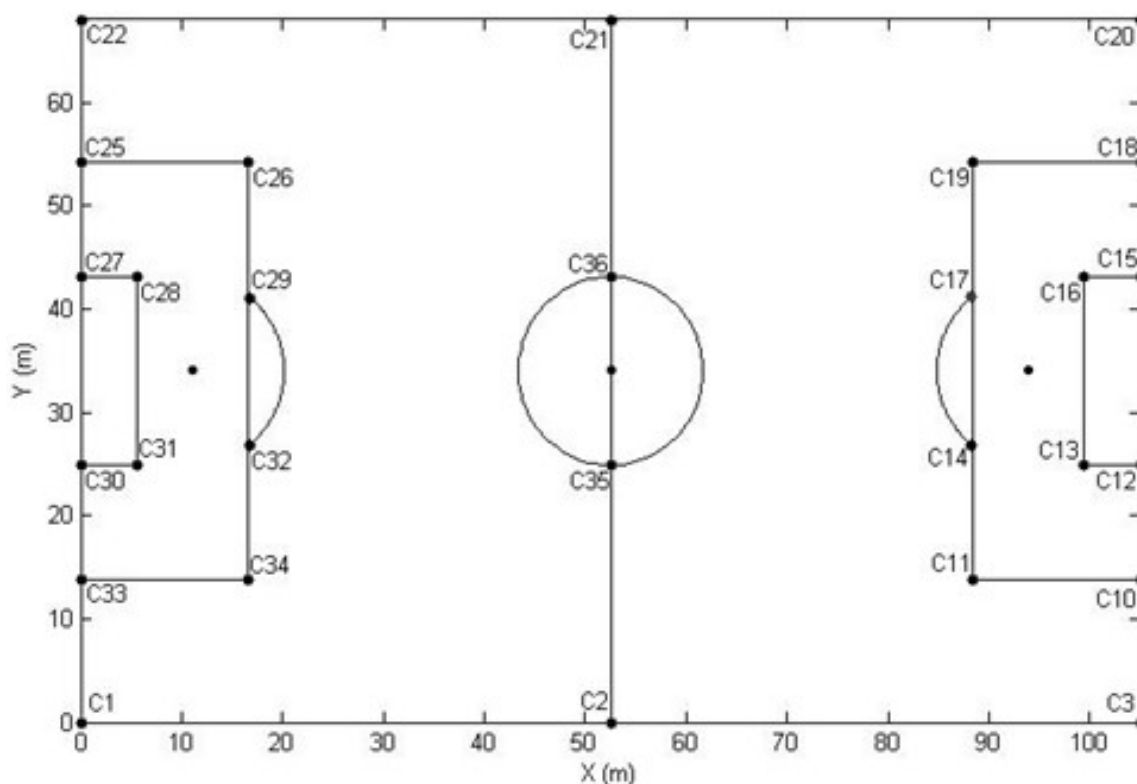
### 3.5.1.2 Registro das coordenadas

O *software* DVideo© foi utilizado para obtenção das coordenadas de tela dos jogadores e conseqüentemente as trajetórias dos mesmos, de acordo com o método de rastreamento automático proposto anteriormente (Figuroa *et al.*, 2006a; b). Esse sistema apresenta um erro médio de 0,3 m na determinação da posição do jogador, e erro relativo de 1,4% para a estimativa de distância percorrida (Misuta, 2004). Os erros do sistema calculados por Misuta (2004) foram obtidos através do cálculo de acurácia. A acurácia é calculada através do valor de bias e precisão, sendo considerado bias o quão distante do valor esperado e precisão o quão aleatório são as medições. Assim, foram calculados os valores de bias e precisão em diversas medições, posteriormente, o valor de acurácia.

### 3.5.1.2.1 Procedimento de calibração

O procedimento de calibração possibilita a reconstrução das coordenadas bidimensionais dos jogadores, transformando as coordenadas de tela em coordenadas reais. Assim a determinação de um sistema de referência, nesse caso, associado ao campo de jogo foi realizada e temos conhecidas as medidas reais do campo (Figura 10). Esse sistema de referência foi determinado através do registro de coordenadas de pontos específicos do campo utilizando-se de uma trena (Figura 10). Assim, foi realizado o procedimento de homografia para obtenção das coordenadas dos jogadores em relação ao sistema de coordenadas associado à área do campo. Para calcular a homografia baseada nesses pontos associados ao campo, no *software* DVideo©, esses pontos foram identificados na imagem projetada e determinados os parâmetros de homografia baseados no método *Direct Linear Transformation* (DLT) proposto por Abdel-Aziz e Karara (1971) adaptado ao sistema bidimensional. Posteriormente, como uma etapa suplementar, foi realizada a verificação da reconstrução das coordenadas desses pontos, através da divergência entre os valores das coordenadas reconstruídas e coordenadas reais do sistema de referência. O processo de calibração foi considerado como efetivo se os pontos projetados na tela coincidissem visualmente com os pontos específicos do campo e os valores de divergência estivessem abaixo de 0,1 m, que corresponde a espessura das linhas limítrofes do campo.

**Figura 10** – Exemplo de pontos utilizados como coordenadas de referência para o processo de homografia.



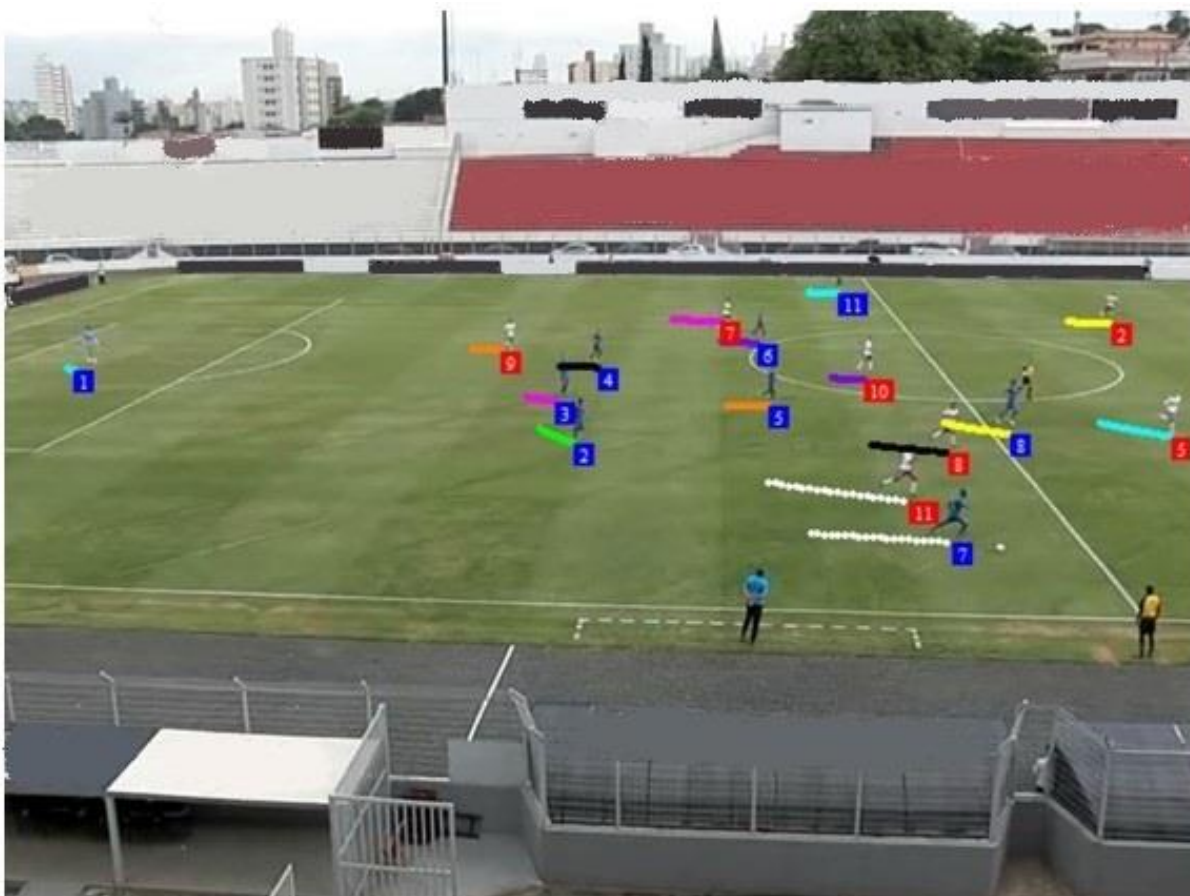
Fonte: Caetano (2016).

### 3.5.1.2.2 Procedimento de rastreamento

O *software* DVideo© possibilita realizar o rastreamento de forma automática e manual. O rastreamento é o processo de registro da coordenada do jogador em função do tempo. Esse processo, quando realizado de forma automática, consiste em identificar a posição do jogador e realizar o adequado procedimento de rotulagem do jogador de forma que o jogador identificado no instante  $t$ , seja o mesmo jogador identificado no instante  $t+1$ , e assim sucessivamente. Então, no rastreamento automático, identifica-se o objeto de interesse (jogador) manualmente em um primeiro instante e o *software* identifica a posição desse objeto nos momentos seguintes. Quando o *software* identificou erroneamente a posição, realizou-se a intervenção de forma manual. O sistema possui taxa de 94% de rastreamento automático para o futebol (Figuroa *et al.*, 2006a; b). A Figura 11 apresenta um exemplo de trajetórias dos jogadores identificadas ao longo de uma

sequência de imagens.

**Figura 11** – Exemplo de trajetórias dos jogadores identificadas ao longo de uma sequência de imagens.



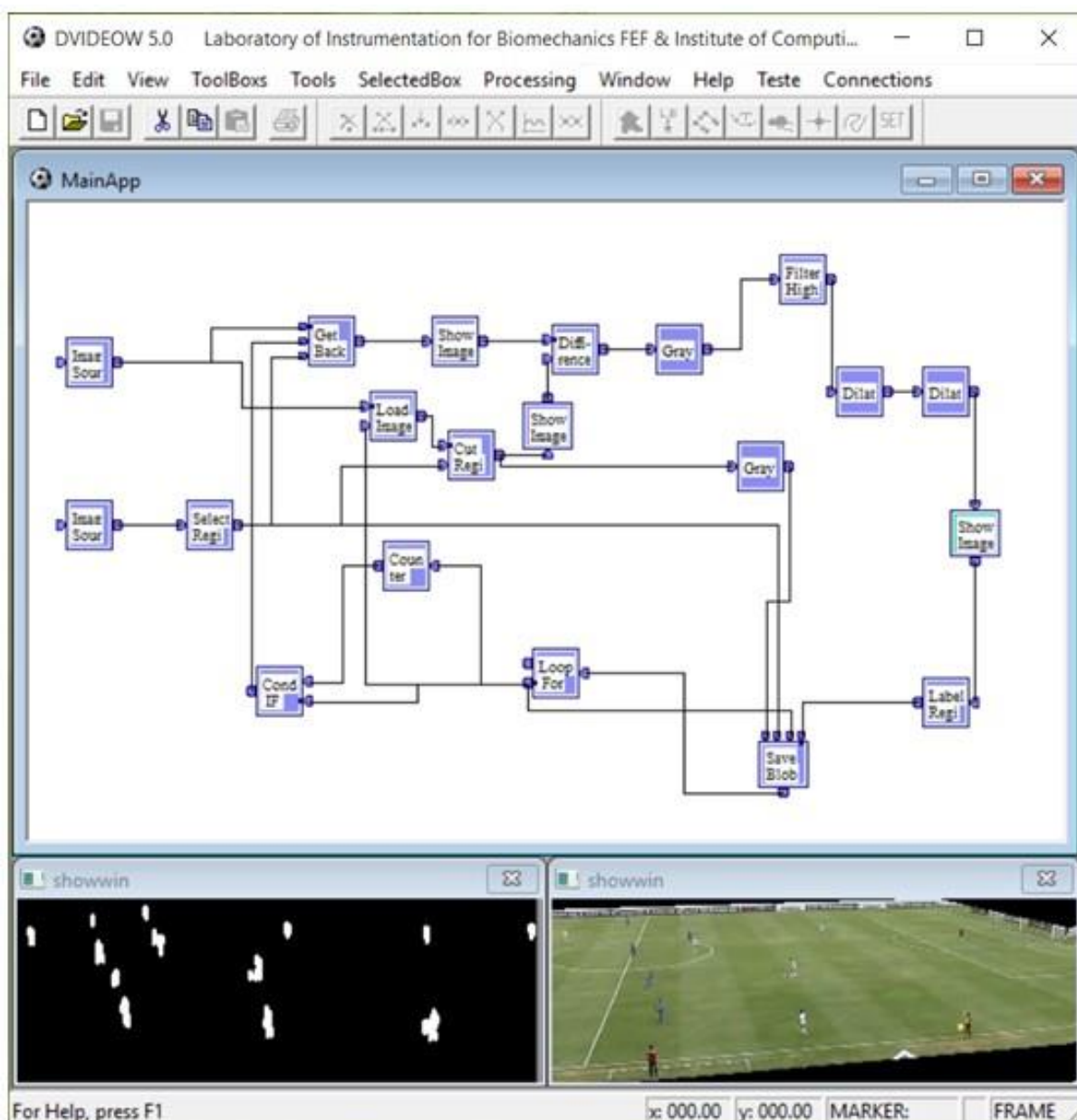
Fonte: Caetano (2016).

### 3.5.1.2.3 Procedimento de segmentação

A segmentação é parte do processo de rastreamento automático (Figura 12, quadro superior) para possibilitar ao *software* identificar automaticamente a posição do objeto de interesse. A função desse processo está em distinguir os elementos de interesse, nesse caso os jogadores (Figura 12, quadro inferior na direita), e separar dos elementos irrelevantes na imagem. O *software* disponibiliza uma interface configurável na qual são realizados diversos processos computacionais em que os parâmetros podem ser ajustados de acordo com as condições da coleta. Nesse procedimento o *software* considera o relevo topográfico definido pela intensidade de *pixels* da imagem do jogador em determinada região do campo. Isso ocorre através de diversas etapas, como por exemplo, a seleção da

região de interesse ou a análise da variação de intensidade de cor dos *pixels* em diversos quadros (*frames*), sendo considerados irrelevantes as imagens com valores de *pixels* constantes. As regiões que correspondem aos jogadores recebem o nome de *blobs* (Figura 12, quadro inferior na esquerda). Cada *blob* possui informações sobre cor, tamanho e coordenadas.

**Figura 12** – Interface do *software* DVideo© utilizada no processo de segmentação, exibindo os algoritmos na parte superior, a imagem original na parte inferior direita, e os *blobs* obtidos na parte inferior esquerda.



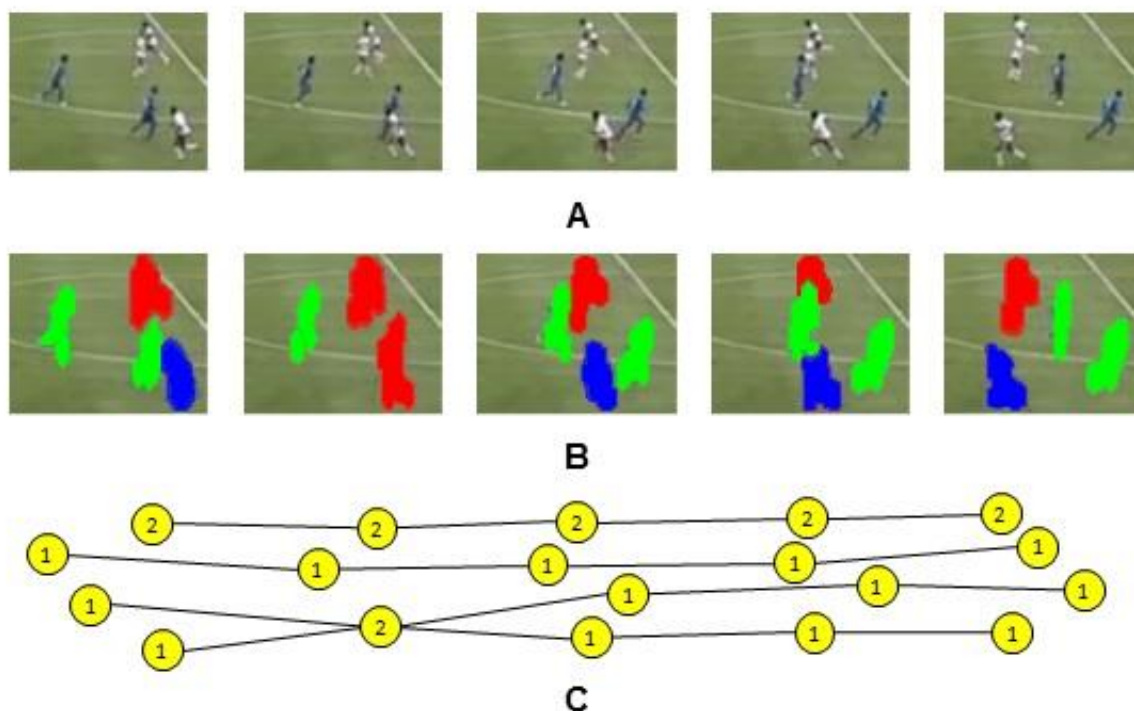
Fonte: Caetano (2016).

Baseado no processo de segmentação, a posição do jogador é

calculada e o processo de obtenção das trajetórias dos jogadores está baseado na teoria de grafos (Szwarcfiter, 1984). O grafo é representado por um conjunto de vértices conectados por arestas, podendo ser visualizado em uma representação geométrica na qual os vértices são pontos distintos do plano e arestas são linhas unindo os pontos correspondentes (Szwarcfiter, 1984). No presente estudo, vértices são representados por um ou mais *blobs* e dois pontos poderiam ser conectados somente por uma aresta (Figura 13). Após serem associados os *blobs* aos jogadores, foi realizada uma etapa suplementar de separação de *blobs* que possuem mais de um jogador, através do procedimento nomeado *splitting blobs*. Esse processo utiliza o próprio jogador como referência, bem como as características presentes no *blob* anterior à junção.

Com base na intensidade das cores de uma região do corpo ou a combinação de diferentes regiões, foi identificado o grupo a que o jogador pertence. Essa intensidade é medida através da faixa de *Red, Green, Blue* (RGB). Assim, os *blobs* receberam cores distintas e são utilizados como parâmetros no momento do rastreamento, sendo a cor verde atribuída a faixas menos intensas de RGB e azul o inverso. Quando não é possível identificar a qual grupo o jogador pertence, o *software* associa esse *blob* a uma terceira cor, o vermelho. Após a construção do grafo realizada a partir das informações dos *blobs*, foi realizado o procedimento de rastreamento para cada jogador separadamente. A seleção do vértice no primeiro quadro foi realizada pelo operador, em sequência, o sistema busca o próximo ponto baseado nas informações do grafo.

**Figura 13** – Representação da construção dos grafos. A partir de uma sequência de imagens (A) criam-se os *blobs* (B) que foram utilizados para a construção do grafo (C). Cada vértice representa um ou mais *blobs* (indicado com o número dentro do círculo), ligados por uma aresta.



**Fonte:** Caetano (2016).

### 3.5.1.3 Registro das ações técnicas

O *software* DVideo© possibilita o registro de ações técnicas ou eventos que ocorreram durante a partida. Através de uma interface do *software* é possível identificar com o *mouse* os eventos de interesse enquanto a sequência de imagens é exibida (Figura 14). A confiabilidade dos dados desse sistema de análise notacional foi avaliada por meio do coeficiente *kappa*, conforme proposto por Cohen (1960). Os valores de concordância intra e interexaminadores foram respectivamente de 97,77% ( $k = 0,9777$ ) e 93,90% ( $k = 0,9390$ ), considerados como concordância quase perfeita para ambas as situações (Landis e Koch, 1977). Sendo assim, foram registradas as ações técnicas realizadas pelos jogadores de ambas as equipes durante as partidas.

As ações técnicas registradas foram condução, defesa do goleiro,

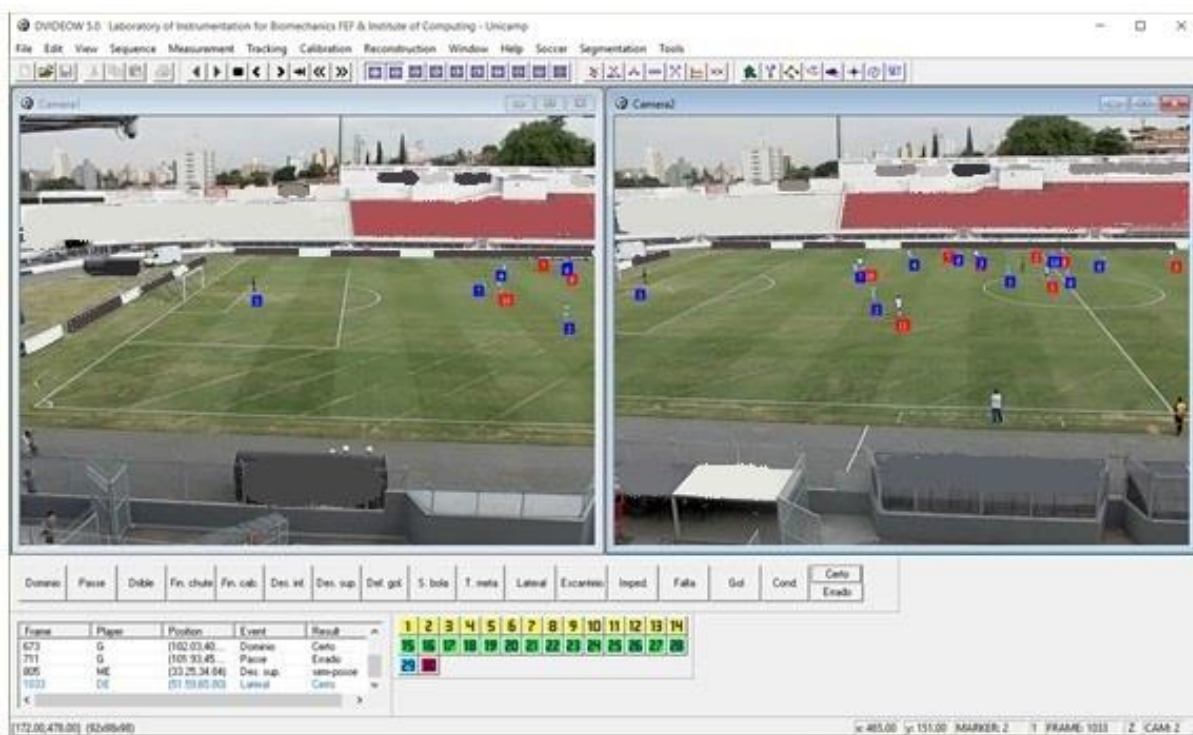
desarme, domínio, drible, escanteio, falta, finalização ao gol, gol, impedimento, lateral, passe, tiro de meta e saída de bola do goleiro. As definições das ações técnicas utilizadas são apresentadas em detalhes, conforme a seguir.

- Condução: ato de deslocar a bola de um ponto ao outro no campo.
- Defesa do goleiro: ação realizada pelo goleiro com intuito de bloquear uma ação da equipe adversária.
- Desarme: ação realizada com intuito de impedir a realização de uma ação da equipe adversária.
- Domínio: ato de recepção da bola preparando para realização de outra ação técnica.
- Drible: qualquer ação realizada com a bola no intuito de ludibriar o adversário, tocando ou até mesmo sem tocar na bola.
- Escanteio: ato de repor a bola ao jogo após ela sair na linha de fundo do campo adversário por fora das traves, sendo o último toque de um jogador adversário.
- Falta: evento no qual o jogador realiza um ato contra um jogador adversário que o árbitro considerou como imprudente, com força excessiva ou se algum jogador tocar a bola com os braços ou mãos dentro do campo, exceto o goleiro na sua própria área penal.
- Finalização ao gol: ato de tocar a bola em direção ao gol adversário com intuito de realizar o gol.
- Gol: evento no qual a bola passa pela linha de fundo do campo entre as traves e abaixo do travessão.
- Impedimento: evento no qual o jogador se encontra no campo adversário e qualquer parte do corpo está mais próxima da linha de fundo do campo do que o penúltimo adversário, com exceção das mãos e braços.
- Lateral: ato de repor a bola ao jogo após ela sair na linha lateral do campo, sendo o último toque de um jogador adversário.
- Passe: ato de tocar a bola com o intuito de que ela alcance outro jogador da sua própria equipe.

- Tiro de meta: ato de repor a bola após ela sair na linha de fundo do seu próprio campo, sendo o último toque de um jogador adversário.
- Saída de bola do goleiro: ato de repor a bola ao jogo após a ocorrência de uma defesa do goleiro.

Após o registro desses eventos, foi criado um algoritmo para identificar todos os instantes de tempo em que ocorreram desarmes, finalizações ao gol, passes certos e errados, bem como identificar qual equipe estava com posse de bola em cada instante de tempo. Dessa forma, foi considerado que a equipe conquistou a posse de bola quando duas ações consecutivas foram realizadas por integrantes dela. Além disso, foi considerado que a equipe não perdeu a posse de bola caso tenha ocorrido uma ação realizada por um jogador da equipe adversária, mas a bola retornou à ela. Em momentos de jogo paralisado, a posse de bola foi atribuída à equipe que realizou a próxima ação. Posteriormente, foram calculados os valores percentuais de posse de bola para cada equipe em cada partida e os números de desarmes, finalizações ao gol, passes certos e errados foram normalizados pelo valor de posse de bola.

**Figura 14** – Interface do *software* DVideo utilizada para o registro das ações técnicas exibindo a sequência de imagens na parte superior, logo abaixo a barra de ações e na parte inferior a lista de registro.



Fonte: Caetano (2016).

### 3.5.2 Análise dos Dados

#### 3.5.2.1 Suavização das coordenadas

Obtidas as coordenadas bidimensionais reais dos jogadores, o procedimento de suavização foi realizado com um filtro digital passa-baixa *Butterworth* de 3ª ordem com frequência de corte de 0,375 Hz. A frequência de corte utilizada foi definida de acordo com o método proposto por Misuta (2004), seguido por uma análise de resíduos e derivadas apresentada por Cunha e Lima Filho (2003).

#### 3.5.2.2 Janela de tempo futuro

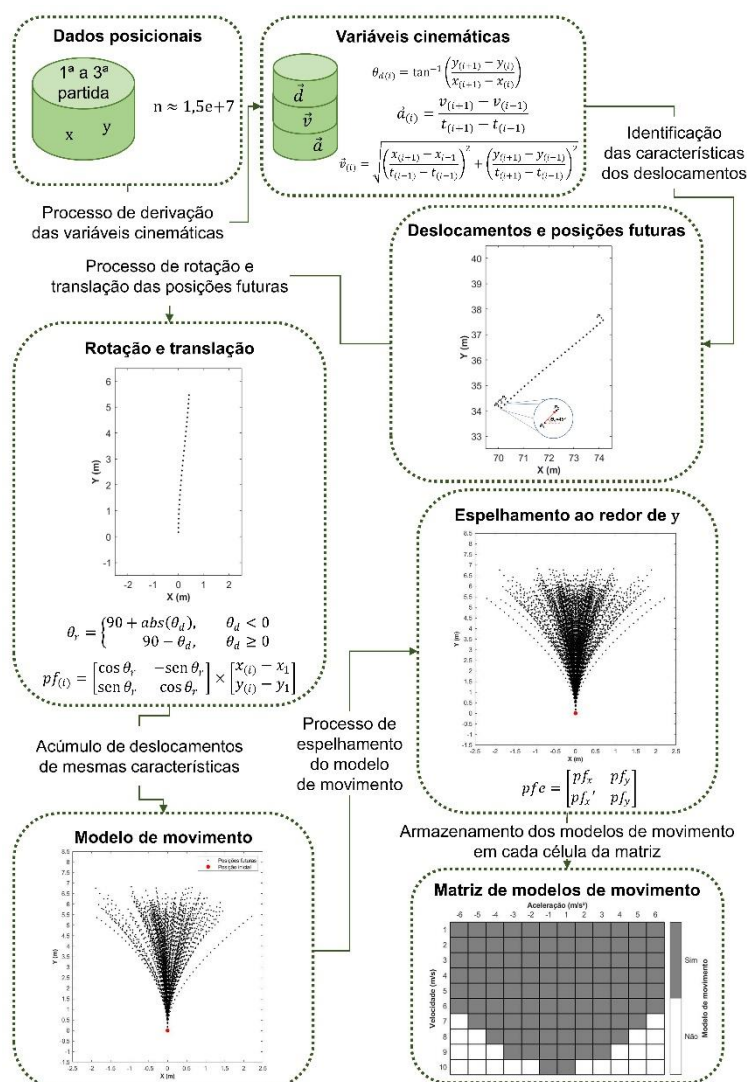
As posições, deslocamentos, velocidades e acelerações a cada instante foram identificadas e as posições de pontos futuros (*pf*) até três segundos

foram registradas. A janela de tempo futuro das posições foi escolhida a partir de um experimento com conjunto de dados de ações técnicas realizadas durante três partidas (1ª a 3ª partida), resultando em 2948 ações de passes analisadas. O experimento foi baseado no comportamento dos jogadores quando eles realizam ações de passes. O jogador com a posse de bola percebe o ambiente, por exemplo, os deslocamentos dos demais jogadores, conseguindo observar uma oportunidade de passar a bola para um companheiro de equipe. Esse fenômeno é descrito como *affordance* (Gibson, 2014; Araújo e Davids, 2016). Os jogadores comumente tentam realizar um passe para uma região em que ele acredita que o seu companheiro de equipe possui domínio, normalmente para onde ele está se movendo. Nesse fenômeno os jogadores estimam intuitivamente a região que o seu companheiro pode alcançar antes que os adversários, conforme já descrito por pesquisadores da área de controle motor em tarefas de interceptação (Savelsbergh *et al.*, 1992). Nesse experimento, foram analisados somente passes de sucesso, por exemplo, passes que foram realizados e a próxima ação técnica foi realizada por um companheiro de equipe, com o intuito de excluir situações que os jogadores têm a intenção de interceptar a bola ou realizar ações de segurança da análise. Os momentos em que o jogador realiza o passe e que o seu companheiro de equipe recebe a bola foram identificados e posteriormente calculada a janela de tempo entre esses dois instantes para todas as ações de passe. Baseado na distribuição dessas janelas de tempo foi analisada e a janela de tempo futuro máxima de três segundos foi determinada, representando aproximadamente 95% dos dados (25º percentil = 1,03 s; 50º percentil = 1,40 s; 75º percentil = 1,86 s; 95º percentil = 3,16 s).

### 3.5.2.3 Modelo de movimento

A Figura 15 apresenta o fluxograma das etapas de criação dos modelos de movimento realizada no presente estudo, todas as etapas são descritas em detalhes conforme a seguir.

Figura 15 – Fluxograma das etapas de criação dos modelos de movimento.



Fonte: O próprio autor.

Os modelos de movimento foram criados a partir das variáveis cinemáticas vetoriais instantâneas dos jogadores derivadas das posições ( $n = 15.112.163$ ) obtidas durante três partidas (1ª a 3ª partida). Primeiramente, foram determinados os ângulos de deslocamento em relação ao eixo longitudinal ( $\theta_d$ ; Equação 1), velocidades ( $v$ ; Equação 2) e acelerações ( $a$ ; Equação 3), derivados das posições dos jogadores em função do tempo.

$$\theta_{d(i)} = \tan^{-1} \left( \frac{y_{(i+1)} - y_{(i)}}{x_{(i+1)} - x_{(i)}} \right), i = 1, \dots, n - 1 \quad (1)$$

$$\vec{v}_{(i)} = \sqrt{\left( \frac{x_{(i+1)} - x_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}} \right)^2 + \left( \frac{y_{(i+1)} - y_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}} \right)^2}, i = 2, \dots, n - 1 \quad (2)$$

$$\vec{a}_{(i)} = \frac{v_{(i+1)} - v_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}}, i = 2, \dots, n - 1 \quad (3)$$

Na qual  $x$  e  $y$  são as coordenadas bidimensionais,  $i$  indica o instante de tempo,  $n$  é o número total de frames, e  $t$  é o intervalo de tempo em segundos.

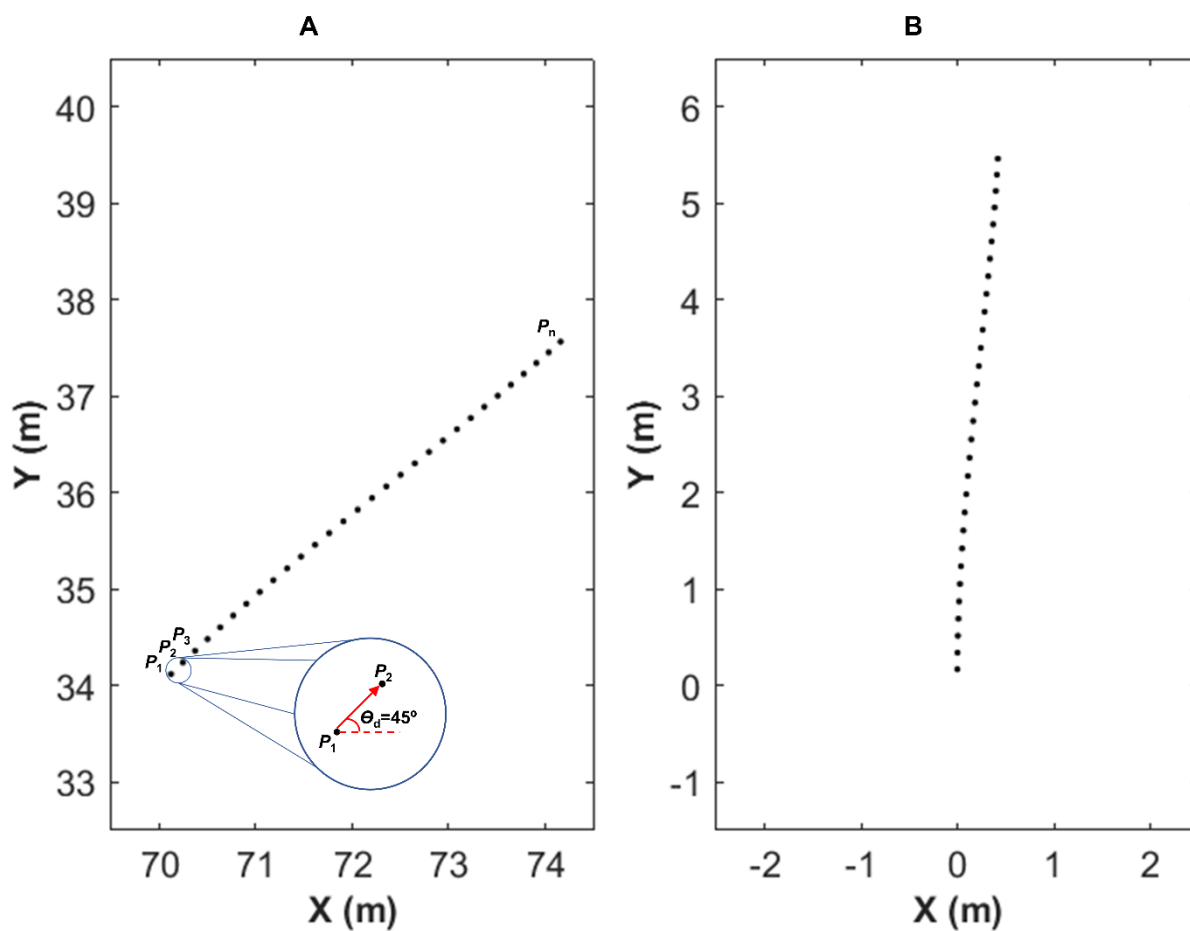
Os ângulos dos deslocamentos foram rodados para  $90^\circ$  ( $\theta_r$ , Equação 4) e a origem das posições futuras foi translada para coordenada 0 nos eixos  $x$  e  $y$  ( $pf$ , Equação 5), conforme exemplificado na Figura 16. Os deslocamentos que se enquadraram nas mesmas combinações de faixas de velocidade e aceleração foram armazenados em suas respectivas células da matriz, gerando um acumulado de posições futuras de diversos deslocamentos que constituem um modelo de movimento (Figura 17A). Além disso os deslocamentos foram espelhados ao redor do eixo  $y$  (Figura 17B) para equilibrar as curvaturas dos modelos de movimento em ambos os lados ( $pfe$ , Equação 6).

$$\theta_r = \begin{cases} 90 + \text{abs}(\theta_d), & \theta_d < 0 \\ 90 - \theta_d, & \theta_d \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$pf_{(i)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\text{sen} \theta_r \\ \text{sen} \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{(i)} - x_1 \\ y_{(i)} - y_1 \end{bmatrix}, i = 1, \dots, 90 \quad (5)$$

Na qual  $x$  e  $y$  indicam as coordenadas bidimensionais,  $i$  representa um instante de tempo, e  $x_1$  e  $y_1$  são as coordenadas bidimensionais iniciais.

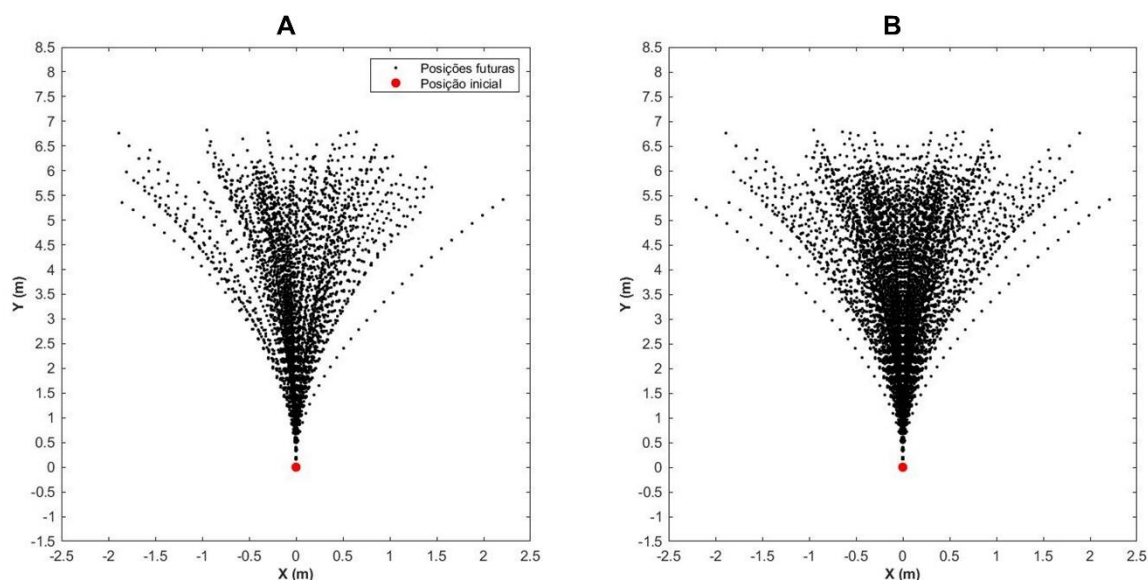
**Figura 16** – Exemplo de posições futuras em que o deslocamento ocorre com velocidade entre 5 e 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s<sup>2</sup>, ângulo de 45° e janela de tempo futuro de um segundo (A) e essas posições futuras após os procedimentos de rotação e translação (B).



Fonte: O próprio autor.

$$pfe = \begin{bmatrix} p f_x & p f_y \\ p f_x' & p f_y' \end{bmatrix} \quad (6)$$

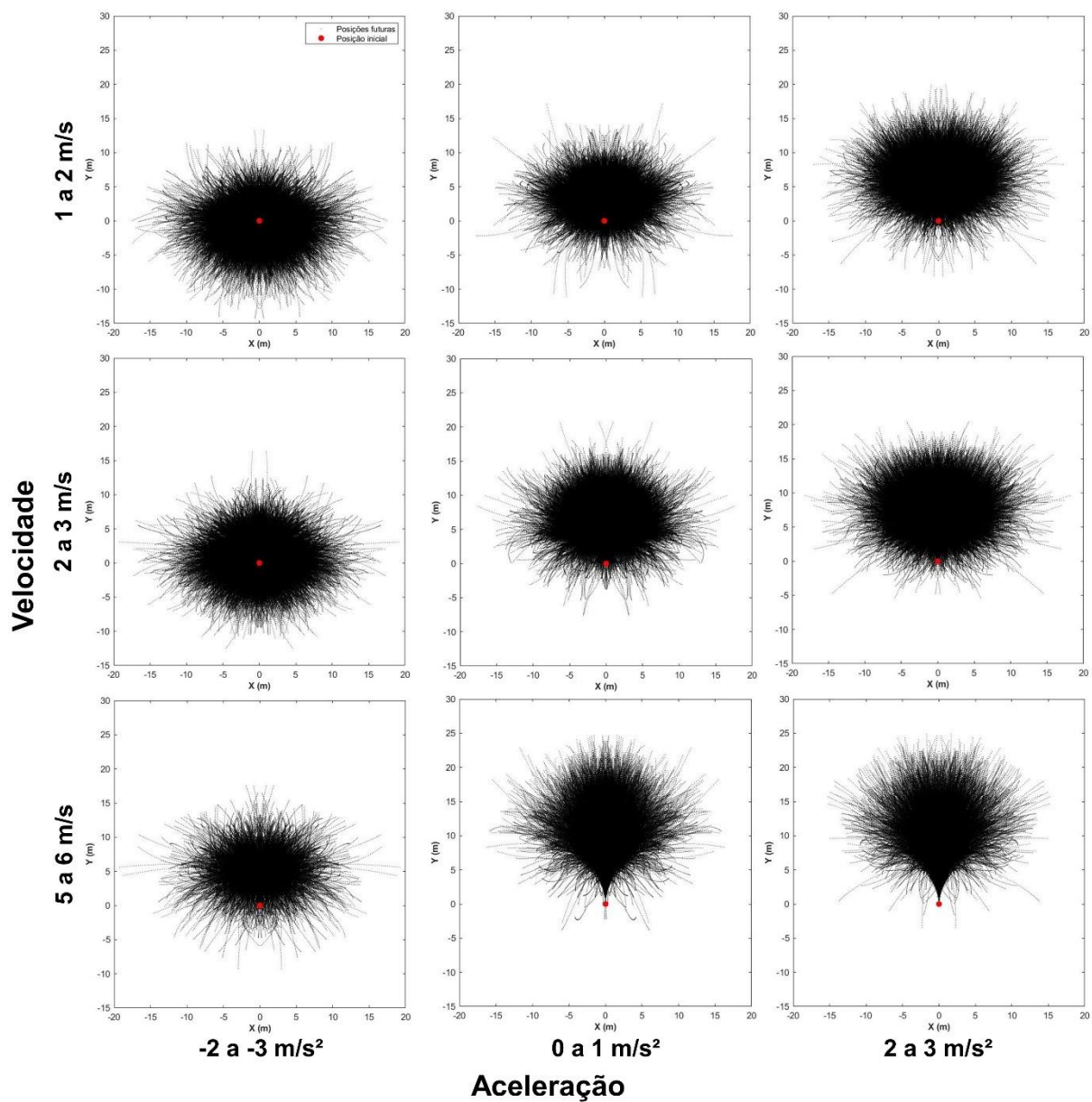
**Figura 17** – Exemplo de modelos de movimento em que os deslocamentos ocorrem com velocidades entre 5 e 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s<sup>2</sup> e janela de tempo futuro de um segundo após os procedimentos de rotação e translação aplicados nas posições futuras (A) e esse modelo de movimento após o processo de espelhamento das coordenadas (B).



**Fonte:** Caetano *et al.* (2021).

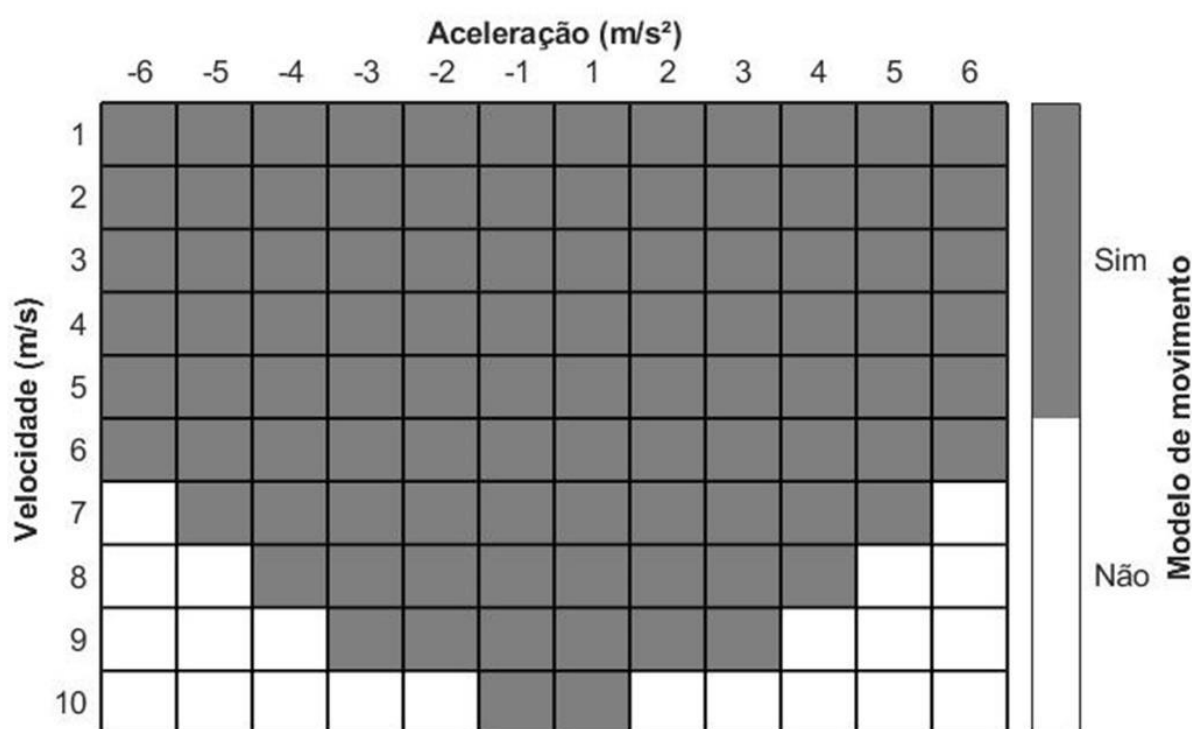
As posições futuras dos jogadores respectivas a cada deslocamento considerando uma janela de tempo futuro fixa de três segundos foram armazenadas em uma matriz, na qual cada célula dessa matriz armazena todos os deslocamentos enquadrados nas mesmas características de velocidade e aceleração constituindo um modelo de movimento. Na Figura 18 são apresentados diferentes modelos de movimento contendo características distintas de velocidade e aceleração, exemplificando que tanto alterações no parâmetro de velocidade dos deslocamentos quanto na aceleração possibilitam aos jogadores atingirem diferentes regiões na mesma janela de tempo futuro. Cada modelo de movimento corresponde a um acumulado de todos os deslocamentos que apresentaram uma mesma combinação específica de velocidade (0 até 10 m/s) e aceleração (-6 até 6 m/s<sup>2</sup>) alternando a cada 1 m/s e 1 m/s<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 19).

**Figura 18** – Exemplos de modelos de movimento gerados a partir de diferentes valores de velocidade e aceleração.



Fonte: O próprio autor.

**Figura 19** – Representação gráfica matricial com as amostras de dados de velocidade e aceleração que foram usadas para criar seus modelos de movimento específicos de acordo com cada intervalo. O sim e não representam as combinações de velocidades e acelerações que foram encontradas e não encontradas, respectivamente.



Fonte: Caetano *et al.* (2021).

### 3.5.2.4 Modelo de probabilidade

Inicialmente, o ângulo de deslocamento, velocidade e aceleração instantâneos foram identificados, então baseado nessas variáveis o respectivo modelo de movimento foi selecionado, rotacionado para direção do deslocamento e transladado para posição atual do jogador (Figura 20A). Posteriormente, com base nas possíveis posições futuras oriundas do respectivo modelo de movimento, as probabilidades de o jogador atingir cada região do campo foram calculadas (Figura 20B) através da função de histograma com a normalização por função de densidade de probabilidade ( $pr$ , Equação 7). A grade utilizada para determinar as probabilidades foi de 0 até 105 m ( $x$ ) e 0 até 68 m ( $y$ ) com uma resolução de 0,1 m, gerando uma matriz (680 linhas por 1050 colunas), na qual cada célula corresponde

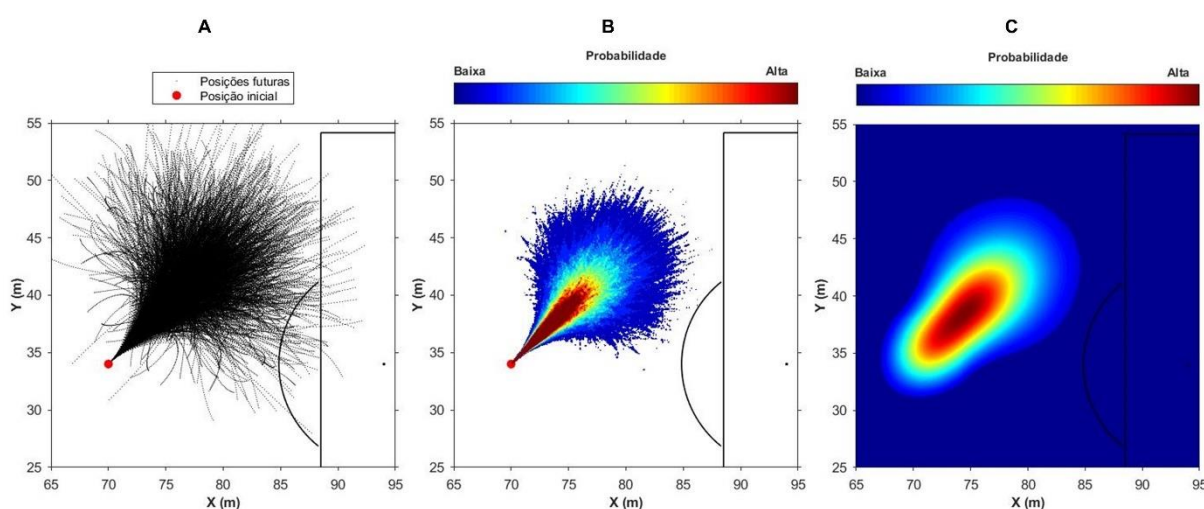
ao valor de probabilidade de uma região específica do campo (0,01 m<sup>2</sup>).

$$pr(j, k) = \frac{c(j,k)}{N \times A}, j = 1, \dots, 680, k = 1, \dots, 1050 \quad (7)$$

Na qual  $j$  e  $k$  são as linhas e colunas da matriz, respectivamente,  $c$  indica o número de elementos na região,  $N$  é o número total de elementos e  $A$  representa a área da região.

Os valores de probabilidade da matriz foram suavizados (Figura 20C) utilizando um filtro de *kernel* Gaussiano de convolução bidimensional para reduzir as características discretas dos resultados da função de histograma com intuito de melhorar a coerência espacial, similar ao previamente proposto por Geerts *et al.* (2019). O desvio padrão ( $\sigma = 20$ ) utilizado no filtro foi escolhido por uma análise visual prévia realizada em todos os modelos de movimento com diferentes valores de  $\sigma$  para ponderar o valor de região de probabilidade entre regiões vizinhas, preservando as arestas e limites. Os modelos de probabilidade possuem valores de 0 a 1, valores inferiores a 0,001 foram arredondados para 0 com intuito de evitar uma associação de regiões com baixa probabilidade como regiões dominantes dos jogadores.

**Figura 20** – Exemplo de modelo de movimento com velocidade de 5 a 6 m/s, aceleração de 2 a 3 m/s<sup>2</sup> e janela de tempo futuro de três segundos rotacionado e transladado para atual deslocamento a um instante de tempo (A), probabilidades de o jogador atingir qualquer região do campo calculadas para esse modelo de movimento (B), e o modelo de probabilidade após o processo de suavização (C).

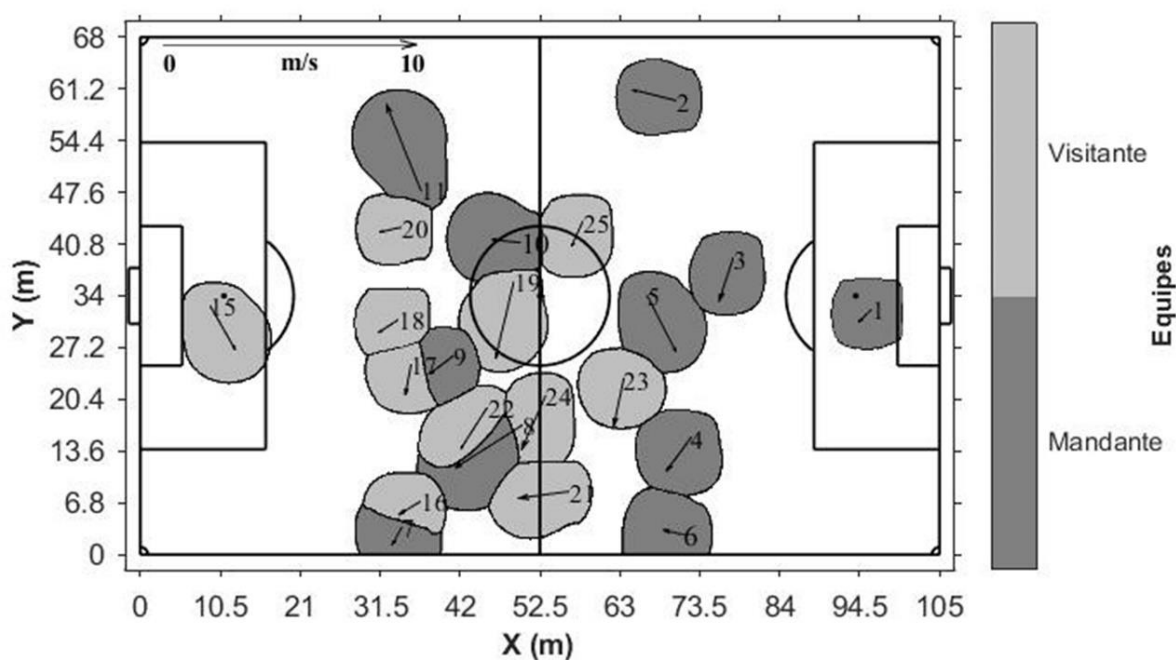


Fonte: Caetano *et al.* (2021).

### 3.5.2.5 Região dominante

As regiões dominantes em cada instante de tempo foram determinadas através da comparação entre as matrizes de probabilidade de todos os jogadores (Figura 21). Assim, cada célula das matrizes foi comparada e registrado o jogador com o maior valor de probabilidade, resultando uma matriz representando o campo com os jogadores identificados como dominante em cada região. As regiões com valores de probabilidade igual a 0 para todos os jogadores não foram associadas a nenhum jogador e consideradas com regiões de espaço livre. As áreas das regiões dominantes e espaços livres foram calculadas utilizando o modelo de movimento com janela de tempo futuro de três segundos. As somas das regiões associadas com cada jogador resultaram nas áreas de suas respectivas regiões dominantes, bem como a soma das regiões não associadas resultou na área dos espaços livres.

**Figura 21** – Exemplo de regiões dominantes determinadas pelo modelo de movimento para todos os jogadores de duas equipes em um instante de tempo. As posições iniciais são representadas pelos números e direções do deslocamento através dos vetores.



Fonte: Caetano *et al.* (2021).

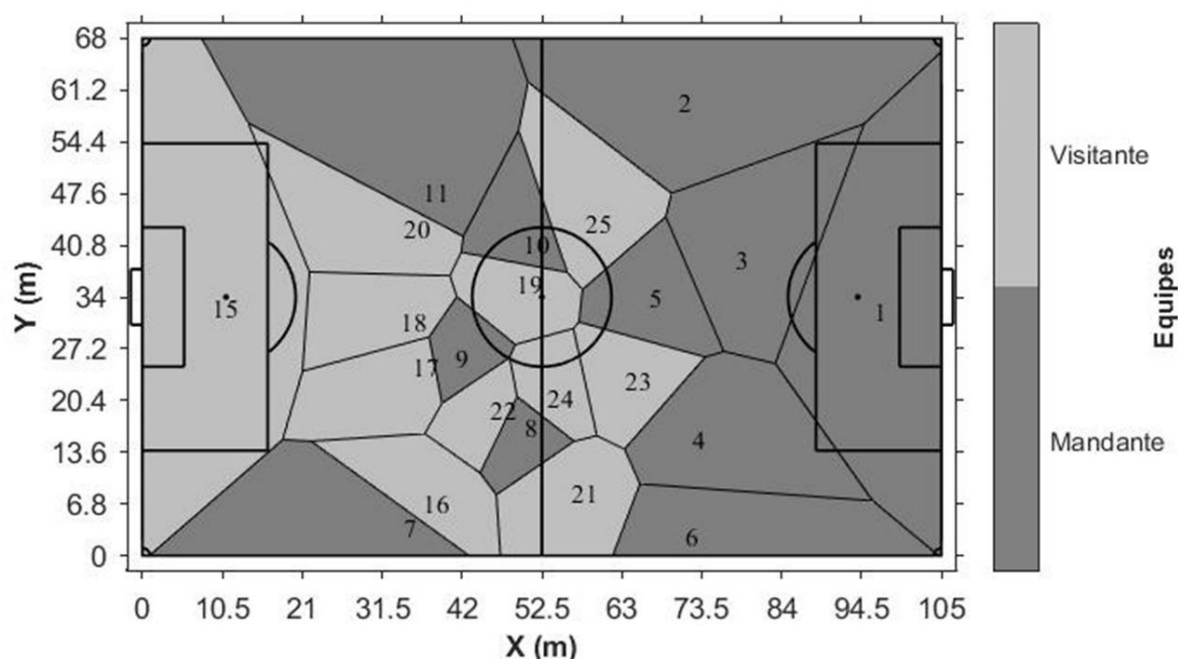
#### 3.5.2.5.1 Avaliação da determinação da região dominante

A avaliação da determinação das regiões dominantes foi realizada utilizando 1.856.030 dados de posição de 22 jogadores durante o primeiro tempo de uma partida (4ª partida) que não foi utilizada para geração dos modelos de movimento. A medida foi realizada através da comparação da região dominante em cada instante de tempo (0,033 s) e a posição real desse jogador a um (T1), dois (T2), e três (T3) segundos futuros. A predição foi considerada correta quando a posição futura real do jogador coincidiu com uma região do campo, ou seja, uma célula da matriz associada previamente como sua região dominante. Os números de predições corretas foram registrados e calculadas as frequências relativas de predição correta para cada janela de tempo futuro.

#### 3.5.2.6 Região de *Voronoi*

O diagrama de *Voronoi* previamente proposto por Kim (2004) para determinar as regiões dominantes dos jogadores foi aplicado no primeiro tempo de uma partida (4ª partida) para possibilitar a comparação com as regiões dominantes determinadas pelo modelo de movimento. O diagrama de *Voronoi* utiliza as coordenadas bidimensionais dos jogadores, assim os polígonos de *Voronoi* são definidos contendo as regiões do campo que são mais próximas a cada jogador comparado aos demais. As áreas desses polígonos foram calculadas para obter os valores de área das regiões dominantes dos jogadores (regiões de *Voronoi*) em cada instante de tempo (Figura 22).

**Figura 22** – Exemplo das regiões de *Voronoi* determinadas para todos os jogadores de duas equipes em um instante de tempo.



Fonte: Caetano *et al.* (2021).

### 3.5.2.7 Aplicação da região dominante

A aplicação da representação da região dominante foi realizada utilizando os dados de posição dos jogadores durante as quatro partidas analisadas. Um processo de redução da frequência de amostragem dos dados de posição dos jogadores foi realizado com o intuito de diminuir a quantidade de dados processados, sendo utilizada nessa etapa a frequência de 7,5 Hz. Uma etapa de verificação da confiabilidade das variáveis de desempenho físico dos jogadores (Tabela 3) entre a frequência de amostragem dos dados original (30 Hz) e reduzida (7,5 Hz) foi realizada através do cálculo de diferença entre as médias, coeficiente de correlação intraclasse e intervalo de confiança de todas as medidas. As classificações do coeficiente de correlação intraclasse e interpretações enquanto a confiabilidade dos dados (< 0,50: Baixa; 0,50 – 0,75: Moderada; 0,75 – 0,90: Boa; > 0,90: Excelente) foram adotadas conforme proposto por Koo e Li (2016), sendo demonstrado que o processo de redução não afetou significativamente essas medidas que são derivadas das variáveis cinemáticas utilizadas para gerar os

modelos de movimento.

**Tabela 3** – Confiabilidade dos resultados das variáveis de desempenho físico dos jogadores após redução da frequência de aquisição.

Variáveis	MD (IC95% LI ± LS)	ICC (IC95% LI ± LS)
Distância total percorrida (m)	-0,054 (-0,153 ± 0,045)	1,000 (0,999 ± 1,000)
Distância percorrida em parado, caminhando e trotando (m)	0,738 (-0,270 ± 1,747)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Distância percorrida em corrida de velocidade baixa (m)	-0,237 (-2,016 ± 1,541)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Distância percorrida em corrida de velocidade moderada (m)	-1,068 (-2,309 ± 0,174)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Distância percorrida em corrida de velocidade alta (m)	0,672 (-0,150 ± 1,494)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Distância percorrida em <i>sprinting</i> (m)	-0,329 (-0,872 ± 0,214)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Velocidade pico (m/s)	-0,007 (-0,016 ± 0,001)	0,999 (0,999 ± 0,999)
<i>Sprint</i> (n)	-0,091 (-0,221 ± 0,040)	0,999 (0,998 ± 0,999)
Aceleração pico (m/s <sup>2</sup> )	-0,057 (-0,078 ± -0,035)	0,998 (0,996 ± 0,999)
Aceleração (n)	-1,273 (-1,806 ± -0,740)	0,998 (0,997 ± 0,999)
Desaceleração pico (m/s <sup>2</sup> )	-0,036 (-0,046 ± -0,026)	0,999 (0,999 ± 0,999)
Desaceleração (n)	-1,182 (-1,939 ± -0,424)	0,997 (0,993 ± 0,998)

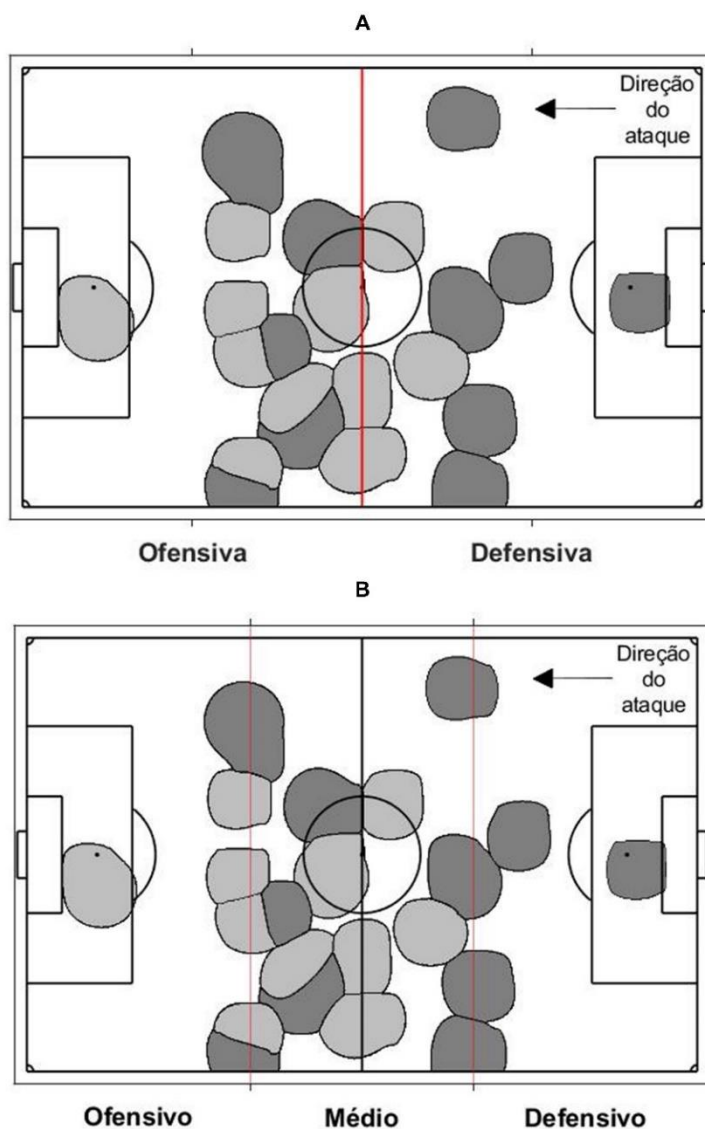
**Nota:** MD: Diferença média; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior; ICC: Coeficiente de correlação intraclasse.

**Fonte:** O próprio autor.

As regiões dominantes das equipes foram determinadas através da soma das regiões dominantes dos jogadores pertencentes a elas. A área de jogo foi determinada através da soma da região dominante de todos os jogadores das duas equipes, assim os valores de região dominante das equipes foram divididos pelos valores de área de jogo para determinar o valor relativo de região dominante das equipes. O valor relativo de área da região dominante das equipes foi calculado com

intuito de demonstrar maior controle de espaço por uma equipe em comparação com a outra. Esses procedimentos foram realizados durante cada partida considerando o campo todo e de acordo com diferentes regiões do campo, como as metades do e terços do campo. As metades do campo foram definidas como duas partes de igual tamanho, sendo considerada metade defensiva a mais próxima do seu próprio gol e metade ofensiva a mais próxima ao gol adversário (Figura 23A). Assim como os terços foram definidos como três partes de igual tamanho, sendo considerado defensivo o mais próximo ao seu próprio gol, médio a região central do campo e ofensivo o mais próximo ao gol adversário (Figura 23B). Quando uma dada região dominante pertencente a uma equipe ocorreu em mais de uma região do campo, por exemplo, uma porção da região dominante está no campo defensivo e outra porção no campo ofensivo, a área de cada porção foi designada para região do campo em que ela se enquadrou.

**Figura 23** – Representação das regiões do campo dividido em metades (A) e terços (B) que serão analisadas as regiões dominantes das equipes.



**Fonte:** O próprio autor.

Além disso, o valor relativo de área da região dominante das equipes considerando o campo todo foi utilizado para avaliar a relação do controle de espaço da equipe com as ações técnicas sob uma perspectiva ofensiva durante as partidas. Foram considerados como indicadores os desarmes sofridos, bem como posse de bola, as finalizações ao gol, passes certos e errados realizados, sendo todos os indicadores normalizados pela posse de bola da equipe, exceto a própria posse de bola.

### 3.5.2.8 Análise estatística

A normalidade da distribuição dos dados foi verificada através do teste de *Lilliefors* e a estatística paramétrica ou não paramétrica foi aplicada conforme adequado. Os percentuais de predições corretas foram apresentados em média e desvio padrão, enquanto os valores de área das regiões dominantes dos jogadores, regiões dominantes das equipes, regiões dominantes relativas das equipes, espaços livres e área de jogo foram apresentados em mediana e intervalo interquartil. Além disso, foram calculados os intervalos de confiança de 95% (IC95%) com limite inferior (LI) e superior (LS) para as médias e medianas. O teste de *Wilcoxon Rank Sum* foi utilizado para comparar os valores de área das regiões dominantes dos jogadores determinadas pelo modelo de movimento e as regiões de *Voronoi*, assim como na comparação entre equipes mandante e visitante para os valores de área das regiões dominantes das equipes e regiões dominantes relativas à área de jogo considerando o campo todo. Posteriormente, foi calculado o tamanho do efeito ( $r$ ) de acordo com o proposto por Rosenthal (1994) e interpretado como pequeno (0 – 0,3), médio (0,4 – 0,7) e grande (> 0,8). O teste de *Kruskal Wallis* foi utilizado para comparar os valores de área da região dominante das equipes e região dominante relativa à área de jogo entre as equipes mandante e visitante, entre as metades defensiva e ofensiva do campo, bem como entre os terços defensivo, médio e ofensivo do campo. Posteriormente foi conduzido o teste de *Bonferroni* para correção do  $P$  em comparações múltiplas e calculado o tamanho do efeito ( $\eta^2$ ) de acordo com o proposto por Tomczak e Tomczak (2014) e interpretado como pequeno (0 – 0,05), médio (0,06 – 0,13) e grande (> 0,14). Todas as classificações de tamanho de efeito foram adotadas conforme o proposto por Cohen (1988). Além disso, a relação das regiões dominantes das equipes relativa à área de jogo com o número de desarmes sofridos, bem como posse de bola, finalizações ao gol, passes certos e errados realizados pelas equipes foi avaliada através do teste de correlação de *Spearman* ( $\rho$ ). As classificações do coeficiente de correlação (0 – 0,3: Desprezível; 0,3 – 0,5: Baixo; 0,5 – 0,7: Moderado; 0,7 – 0,9: Alto; 0,9 – 1: Muito alto) foram adotadas de acordo com o proposto por Hinkle *et al.* (2003). O nível de significância estatística adotado para todas as análises foi de  $P < 0,05$ .

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PREDIÇÕES CORRETAS NA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE

A Tabela 4 apresenta os valores das previsões corretas para T1, T2 e T3 (média, desvio padrão e intervalo de confiança) durante todo tempo analisado. Os valores de previsões corretas encontrados foram superiores para T1 em comparação aos demais, bem como para T2 em relação a T3.

**Tabela 4** – Valores de percentuais de previsões corretas (média, desvio padrão e intervalo de confiança) para janela de tempo futuro de um, dois e três segundos.

Janela de tempo futuro	Média (Desvio padrão)	IC95% (LI; LS)
T1	96,56 (1,54)	0,62 (95,94; 97,17)
T2	88,64 (4,75)	1,90 (86,74; 90,54)
T3	72,31 (9,41)	3,76 (68,55; 76,07)

**Nota:** T1: Janela de tempo futuro de um segundo; T2: Janela de tempo futuro de dois segundos; T3: Janela de tempo futuro de três segundos; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior.

**Fonte:** O próprio autor.

### 4.2 ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DOS JOGADORES E ESPAÇOS LIVRES

A Tabela 5 apresenta os valores das áreas da região dominante dos jogadores determinadas pelo nosso modelo de movimento e regiões de *Voronoi* para todo o tempo analisado (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança). Os valores de área da região dominante determinadas pelo nosso modelo de movimento foram menores aos encontrados nas regiões de *Voronoi* ( $P < 0,01$ ;  $r = 0,53$ ; Médio). A Figura 24 apresenta o diagrama de caixas representando a área das regiões dominantes de cada jogador determinadas pelo nosso modelo de movimento e as regiões de *Voronoi*.

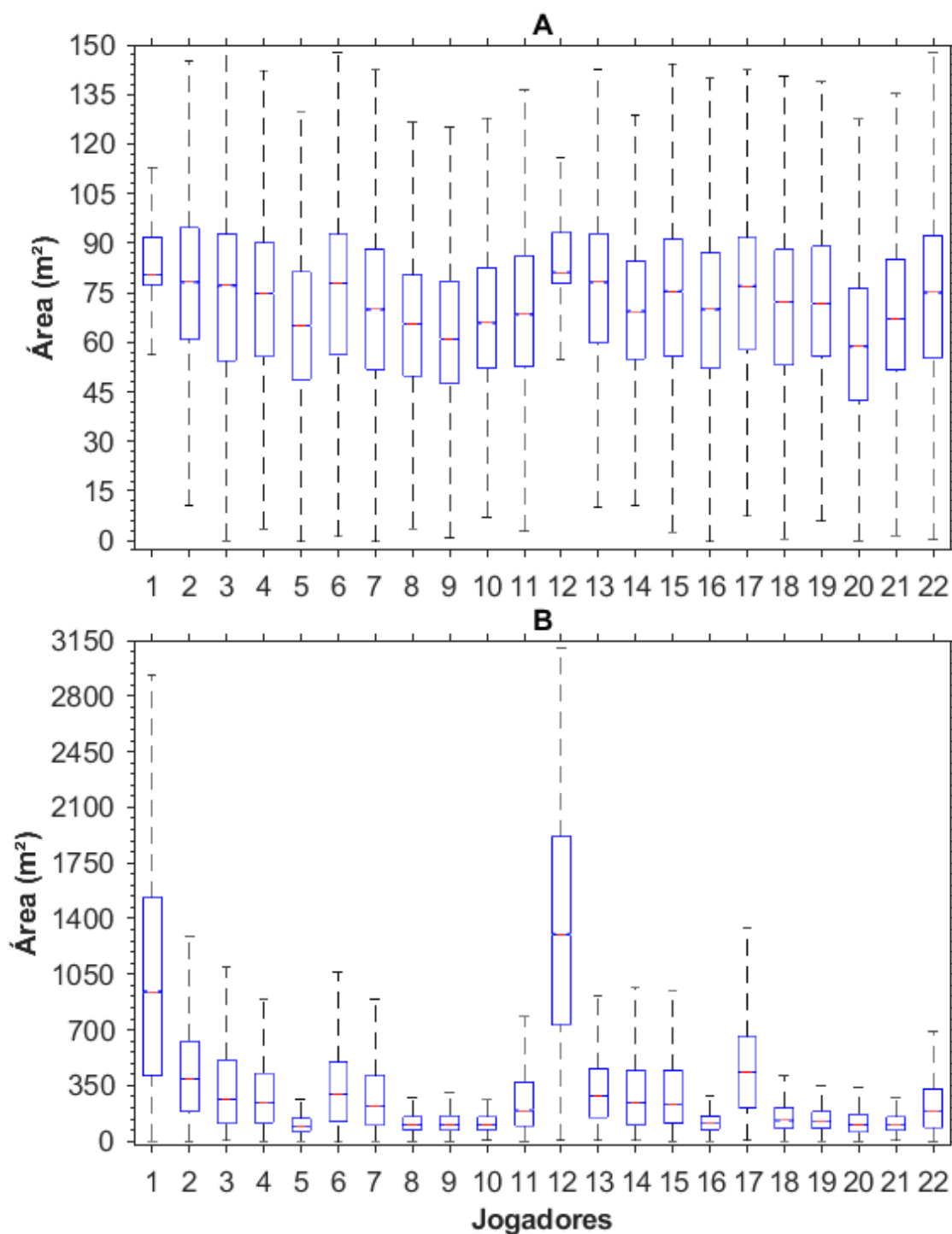
**Tabela 5** – Valores das áreas (m<sup>2</sup>) de região dominante dos jogadores determinadas pelo nosso modelo de movimento e regiões de *Voronoi* (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança).

<b>Região dominante</b>	<b>Mediana (IQR [P25%; P75%])</b>	<b>IC95% (LI; LS)</b>
<b>Modelo de movimento</b>	73 * (35 [54; 89])	0,04 (73,09; 73,17)
<b>Região de <i>Voronoi</i></b>	171 (324 [88; 411])	0,37 (170,74; 171,49)

**Nota:** IQR: Intervalo interquartil; P25%: 25º percentil; P75%: 75º percentil; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior; \*: Significativamente ( $P < 0,01$ ) diferente da região de *Voronoi*.

**Fonte:** O próprio autor.

**Figura 24** – Diagrama de caixas representando a mediana (barras vermelhas), 25º e 75º percentil (caixas azuis), mínimo e máximo (barras pretas) das áreas das regiões dominantes de cada jogador determinadas pelo nosso modelo de movimento (A) e regiões de *Voronoi* (B).



Fonte: Caetano *et al.* (2021)

Os valores encontrados para área dos espaços livres (mediana e

intervalo interquartil) durante todo o tempo analisado resultantes da determinação da região dominante através do nosso modelo de movimento foram 5.537 m<sup>2</sup> (IC95%: 1,85; LI: 5.535,11; LS: 5.538,81) e 342 m<sup>2</sup> (P25%: 5.371; P75%: 5.712), respectivamente. O valor mínimo encontrado foi de 4.677 m<sup>2</sup> e o máximo foi 6.476 m<sup>2</sup>. O valor mediano de área dos espaços livres representa aproximadamente 77% da área do campo, com o valor mínimo encontrado representando 66% e o máximo 91%.

#### 4.3 ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES EM DIFERENTES CONTEXTOS

Os valores da área de região dominante das equipes (mediana e intervalo interquartil) considerando o campo todo foram 794 m<sup>2</sup> (IC95%: 0,52; LI: 793,25; LS: 794,29) e 193 m<sup>2</sup> (P25%: 693; P75%: 886), respectivamente. A área de jogo considerando o campo todo apresentou mediana 1.588 m<sup>2</sup> (IC95%: 1,37; LI: 1.587,45; LS: 1.590,20) e intervalo interquartil 358 m<sup>2</sup> (P25%: 1.401; P75%: 1.758), sendo o valor mínimo encontrado de 285 m<sup>2</sup> e máximo de 2.681 m<sup>2</sup>, que representam aproximadamente 22% (mediana), 4% (mínimo) e 38% (máximo) da área do campo. Por outro lado, a mediana da área de espaço livre foi 5.551 m<sup>2</sup> (IC95%: 1,37; LI: 5.549,80; LS: 5.552,55) e intervalo interquartil 358 m<sup>2</sup> (P25%: 5.381; P75%: 5.739). Os valores de máximo e mínimo encontrados foram respectivamente de 6.855 m<sup>2</sup> e 4.459 m<sup>2</sup>, representando 96% e 62% da área do campo. A Tabela 6 apresenta os valores de área da região dominante e região dominante relativa à área de jogo considerando o campo todo e as equipes mandante e visitante. Os valores de área da região dominante das equipes mandantes foram superiores ( $P < 0,01$ ;  $r = 0,04$ ; Pequeno) em comparação as equipes visitantes. Assim como a região dominante das equipes mandantes relativa à área de jogo foi superior à das equipes visitantes ( $P < 0,01$ ;  $r = 0,09$ ; Pequeno).

**Tabela 6** – Valores das áreas (m<sup>2</sup>) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando o campo todo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança).

Equipe	Região dominante (m <sup>2</sup> )		Região dominante relativa (%)	
	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)
<b>Mandante</b>	799 * 193 (699; 892)	0,74 (798,48; 799,96)	50,33 * 4,70 (48,00; 52,70)	0,02 (50,31; 50,34)
<b>Visitante</b>	789 192 (688; 880)	0,74 (787,82; 789,30)	49,67 4,70 (47,30; 52,00)	0,02 (49,65; 49,69)

**Nota:** IQR: Intervalo interquartil; P25%: 25º percentil; P75%: 75º percentil; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior; \*: Significativamente ( $P < 0,01$ ) diferente da equipe visitante.

**Fonte:** O próprio autor.

A Tabela 7 apresenta os valores de área da região dominante e região dominante relativa das equipes mandantes e visitantes considerando a metade do campo defensiva e ofensiva. Os resultados de região dominante apresentaram diferenças ( $H(3) = 103.372,79$ ;  $P < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,15$ ; Grande) em relação às equipes e metades do campo, sendo encontrados valores superiores para ambas as equipes na metade defensiva em comparação a ofensiva. Na metade ofensiva, as equipes mandantes apresentaram valores superiores às visitantes, enquanto na metade ofensiva foram visualizados valores inferiores para as equipes mandantes. Quando comparados os valores de região dominante relativa ( $H(3) = 459.193,59$ ;  $P < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,68$ ; Grande), foram encontrados valores superiores para ambas as equipes na metade defensiva em relação a metade ofensiva do campo, assim como os valores das equipes mandantes foram superiores aos das equipes visitantes em ambas metades do campo.

**Tabela 7** – Valores das áreas (m<sup>2</sup>) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando as metades do campo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança).

Equipe	Região dominante (m <sup>2</sup> )		Região dominante relativa (%)	
	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)
<b>Metade defensiva</b>				
<b>Mandante</b>	482 *# 374 (292; 666)	1,43 (480,96; 483,83)	66,71 *# 23,45 (58,29; 81,74)	0,09 (66,62; 66,80)
<b>Visitante</b>	510 # 364 (311; 676)	1,40 (509,02; 511,82)	64,54 # 23,70 (57,02; 80,72)	0,09 (64,45; 64,63)
<b>Metade ofensiva</b>				
<b>Mandante</b>	292 * 411 (78; 490)	1,58 (290,89; 294,05)	35,46 * 23,70 (19,28; 42,98)	0,09 (35,37; 35,55)
<b>Visitante</b>	258 405 (62; 467)	1,55 (256,39; 259,49)	33,29 23,45 (18,26; 41,71)	0,09 (33,20; 33,38)

**Nota:** IQR: Intervalo interquartil; P25%: 25º percentil; P75%: 75º percentil; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior; \*: Significativamente ( $P < 0,001$ ) diferente da equipe visitante; #: Significativamente ( $P < 0,001$ ) diferente da metade ofensiva.

**Fonte:** O próprio autor.

A Tabela 8 apresenta os valores de área da região dominante e região dominante relativa das equipes mandantes e visitantes considerando os terços do campo defensivo, médio e ofensivo. Os resultados de região dominante apresentaram diferenças ( $H(5) = 333.948,96$ ;  $P < 0,0001$ ;  $\eta^2 = 0,33$ ; Grande), sendo encontrados valores superiores no terço médio, seguido pelo defensivo e os menores valores no terço ofensivo para ambas as equipes. Quando comparados os valores das equipes foram obtidos valores superiores para as equipes mandantes nos terços médio e ofensivo, enquanto no terço defensivo os valores das equipes

visitantes foram maiores. Os valores de região dominante relativa também apresentaram diferenças ( $H(5) = 717.013,68$ ;  $P < 0,0001$ ;  $\eta^2 = 0,71$ ; Grande) nos terços defensivo e ofensivo do campo, sendo encontrados valores superiores para as equipes mandantes.

**Tabela 8** – Valores das áreas (m<sup>2</sup>) de região dominante e região dominante relativa à área de jogo (%) das equipes considerando os terços do campo (mediana, intervalo interquartil e intervalo de confiança).

Equipe	Região dominante (m <sup>2</sup> )		Região dominante relativa (%)	
	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)	Mediana IQR (P25%; P75%)	IC95% (LI; LS)
<b>Terço defensivo</b>				
<b>Mandante</b>	198 *#\$ 327 (81; 409)	1,25 (197,32; 199,82)	89,18 *#\$ 31,96 (68,04; 100)	0,12 (89,06; 89,30)
<b>Visitante</b>	226 # 326 (93; 419)	1,25 (224,65; 227,15)	83,79 # 34,48 (65,52; 100)	0,13 (83,66; 83,93)
<b>Terço médio</b>				
<b>Mandante</b>	425 *\$ 278 (269; 547)	1,07 (424,09; 426,22)	50,81 \$ 19,78 (40,60; 60,38)	0,08 (50,74; 50,89)
<b>Visitante</b>	415 \$ 299 (241; 540)	1,14 (413,70; 415,98)	49,19 \$ 19,78 (39,62; 59,40)	0,08 (49,11; 49,26)
<b>Terço ofensivo</b>				
<b>Mandante</b>	45 * 222 (0; 222)	0,85 (44,23; 45,93)	16,21 * 34,48 (0; 34,48)	0,13 (16,07; 16,34)
<b>Visitante</b>	20 201 (0; 201)	0,77 (19,59; 21,13)	10,82 31,96 (0; 31,96)	0,12 (10,70; 10,94)

**Nota:** IQR: Intervalo interquartil; P25%: 25º percentil; P75%: 75º percentil; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior; \*: Significativamente ( $P < 0,0001$ ) diferente da equipe visitante; #: Significativamente ( $P < 0,0001$ ) diferente do terço médio; \$: Significativamente ( $P < 0,0001$ ) diferente do terço ofensivo.

**Fonte:** O próprio autor.

#### 4.4 RELAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES COM AÇÕES TÉCNICAS

As correlações entre as regiões dominantes das equipes relativas à área de jogo considerando o campo todo (média: 50%; desvio padrão: 0,88; IC95%: 0,43; LI: 49,57; LS: 50,43) e as ações técnicas são apresentadas na Tabela 9. Os principais achados demonstraram que a região dominante relativa foi significativamente correlacionada negativamente com o número de desarmes sofridos ( $P = 0,01$ ; rho: -0,62; Moderado) e passes errados realizados ( $P < 0,01$ ; rho: -0,70; Moderado). Além disso, uma correlação positiva significativa foi encontrada com o número de finalizações ao gol realizadas ( $P < 0,01$ ; rho: 0,69; Moderado), passes certos ( $P < 0,05$ ; rho: 0,51; Moderado) e a posse de bola ( $P < 0,01$ ; rho: 0,79; Alto).

**Tabela 9** – Matriz de correlação entre os valores de região dominante das equipes relativas à área de jogo considerando o campo todo com o número de desarmes sofridos, finalizações ao gol realizadas, passes certos e errados realizados e a posse de bola.

Ações técnicas	Região dominante relativa (%)		
	<i>P</i>	rho	LI ± LS (IC95%)
<b>Desarmes sofridos (n / %PB)</b>	0,0121	-0,6206	-0,8537 ± -0,1804
<b>Finalizações ao gol realizadas (n / %PB)</b>	0,0042	0,6882	0,2922 ± 0,8828
<b>Passes certos realizados (n / %PB)</b>	0,0464	0,5088	0,0175 ± 0,8022
<b>Passes errados realizados (n / %PB)</b>	0,0036	-0,6971	-0,8865 ± -0,3077
<b>Posse de bola (%)</b>	0,0004	0,7882	0,4801 ± 0,9232

**Nota:** %PB: Percentual da posse de bola; IC95%: Intervalo de confiança de 95%; LI: Limite inferior; LS: Limite superior.

**Fonte:** O próprio autor.

## 5 DISCUSSÃO

O presente estudo teve como proposta apresentar uma nova abordagem de representação da região dominante de jogadores de futebol baseada em modelos de movimento criados a partir das suas posições, deslocamentos, velocidades e acelerações instantâneas originados a partir de dados de partidas oficiais. Especificamente, o intuito foi compreender o controle espaço-temporal dos jogadores a partir de uma abordagem que considera a natureza dinâmica de uma partida de futebol e seja mais compatível com a capacidade física humana. Além disso, objetivou-se verificar as predições corretas da abordagem proposta, realizar a comparação dos valores de área da região dominante dos jogadores gerados com o método comumente utilizado (diagrama de *Voronoi*) e elucidar os espaços livres no campo. Assim como aplicar a abordagem proposta para compreender o controle espaço-temporal das equipes em diferentes contextos, como em diferentes regiões do campo e a área de jogo instantânea gerada, bem como analisar a relação do controle espaço-temporal das equipes com indicadores de ações técnicas realizadas durante as partidas sob uma perspectiva ofensiva. Os resultados a respeito de avaliação da determinação das regiões dominantes dos jogadores demonstraram uma redução nos valores de predições corretas conforme o aumento da janela de tempo futuro confirmando nossa hipótese inicial acerca desse tópico. Quando observado os resultados de comparação entre as áreas de região dominante dos jogadores, nossa hipótese de que as regiões dominantes determinadas pelo nosso modelo proposto seriam menores que as regiões de *Voronoi* também foi confirmada. Na análise da relação entre a região dominante das equipes com as ações técnicas foi confirmada pela correlação negativa encontrada com o número de desarmes sofridos e passes errados realizados, bem como pela relação positiva com a posse de bola, finalização ao gol e passes certos realizados. Os achados do presente estudo serão discutidos em mais detalhes, conforme a seguir.

### 5.1 PREDIÇÕES CORRETAS NA DETERMINAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE

A avaliação da determinação das regiões dominantes dos jogadores foi realizada com intuito de verificar se os jogadores em um dado instante estavam em regiões anteriormente associadas como suas regiões dominantes. A predição de

eventos que ocorrem em um espaço de tempo menor pode ser mais precisa, esse fenômeno foi visualizado no presente estudo nos resultados de avaliação da determinação da região dominante dos jogadores que apresentaram uma redução nas predições corretas conforme aumenta a janela de tempo futuro utilizada. Uma possível explicação para isso seria a natureza dinâmica do futebol em que as ações dos jogadores são influenciadas por movimentos de outros jogadores, bem como a localização da bola ou a alteração dela (McGarry *et al.*, 2002). Um outro estudo conduzido por Rienzi *et al.* (2000) apresentou informações similares, demonstrando mudanças em atividades aproximadamente a cada quatro segundos em uma análise do perfil de demanda física durante partidas internacionais de futebol. Apesar da redução do percentual de predições corretas conforme o aumento da janela de tempo futuro, o resultado atingido de 72,31% para T3 é promissor porque essa janela de tempo futuro é maior do que as utilizadas nos estudos anteriores (Taki e Hasegawa, 2000; Fujimura e Sugihara, 2005; Ueda *et al.*, 2014; Brefeld *et al.*, 2019). Entretanto, é difícil traçar um paralelo com os resultados de estudos encontrados na literatura porque não existe um consenso da janela de tempo futuro utilizada para gerar os modelos de movimento, variando de um segundo (Brefeld *et al.*, 2019), dois segundos (Fujimura e Sugihara, 2005), ou o tempo mais curto para atingir um local específico (Taki e Hasegawa, 2000). Além disso, nenhum desses estudos reportaram resultados acerca de predições corretas ou qualquer outra avaliação da determinação da região dominante dos jogadores.

## 5.2 ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DOS JOGADORES E ESPAÇOS LIVRES

Os resultados de área das regiões dominantes dos jogadores possibilitaram visualizar valores medianos menores nas regiões dominantes determinadas a partir do modelo de movimento quando comparada com as regiões de *Voronoi*. Também, a significância estatística, juntamente com o tamanho do efeito encontrados no nosso experimento, sugere que o mesmo comportamento pode ser encontrado em experimentos futuros. No entanto, a comparação dos valores de área obtidos no presente estudo em relação a estudos anteriores não é possível pelo fato que somente o estudo conduzido por Ueda *et al.* (2014) reportou valores de área das regiões dominantes. Contudo, em seu estudo Ueda *et al.* (2014) analisaram somente as regiões dominantes das equipes como um todo. Os valores de áreas

menores em regiões dominantes determinadas pelo modelo de movimento no presente estudo provavelmente ocorrem devido ao fato dessa abordagem considerar regiões rotuladas como espaço livre e as regiões de *Voronoi* não as considerar (Figura 22). A consideração de espaços livres no campo foi realizada com intuito de evitar que regiões sem dominância clara fossem associadas como regiões dominantes dos jogadores. Esse fenômeno pode ser exemplificado por uma situação de escanteio, na qual as regiões de *Voronoi* consideram que os defensores da equipe ofensiva têm domínio de seu campo defensivo por serem os jogadores mais próximos dessa região, enquanto um ataque rápido após o escanteio pode mostrar que essa área controlada não é real porque jogadores com maior velocidade e aceleração naquele instante podem atingi-las em alguns segundos. Essa é uma das principais contribuições da nossa abordagem, demonstrando que os defensores não estão realmente “controlando” essas regiões que estão associadas a eles conforme o conceito de *Voronoi*. Um ponto a se destacar é que a área mediana de espaços livres encontradas no presente estudo corresponde a aproximadamente 77% da área total do campo, o valor mínimo encontrado foi próximo a 66% e o máximo de 91%. O valor máximo encontrado possivelmente ocorreu durante eventos específicos das partidas, como por exemplo, durante um escanteio, em uma situação em que quase todos os jogadores compartilham uma região pequena do campo, com bastante proximidade entre os jogadores adversários, conforme sugerido anteriormente (Caetano *et al.*, 2020). Essas regiões sem dominância podem ser consideradas como espaços livres distantes da concentração do jogo e fisicamente impossíveis de serem atingidos pelos jogadores em um curto espaço de tempo, ou seja, regiões próximas da localização da bola comumente contêm um maior número de jogadores. Esse comportamento pode ocorrer porque a bola funciona como um atrator durante uma partida de futebol (McGarry *et al.*, 2002), representando a concentração do jogo próxima a ela. Um resultado semelhante foi encontrado por Narizuka *et al.* (2021) que avaliaram as regiões do campo, ponderando-as em relação ao grau de densidade e demonstraram que as regiões mais densas se encontram dentro da formação das equipes, consideradas como desvio padrão do centroide das posições dos jogadores. Entretanto, essas regiões sem dominância também podem representar espaços chave a serem explorados pelos jogadores com o objetivo de maximizar suas chances de sucesso em tentativas ofensivas ou para prevenir as tentativas ofensivas dos seus adversários.

Similarmente, um estudo anterior utilizando o diagrama de *Voronoi* relatou que a dominância de espaço no terço ofensivo do campo estava relacionada com o número de gols marcados e a probabilidade de vencer a partida (Rein *et al.*, 2017). De maneira semelhante, Ueda *et al.* (2014) demonstrou que maiores valores de área dominante das equipes foi associada ao sucesso sob perspectiva ofensiva quando a posse de bola foi adquirida no terço central do campo, por outro lado, o sucesso defensivo foi relacionado com menores valores de área nessa mesma situação.

### 5.3 ÁREA DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES EM DIFERENTES CONTEXTOS

Os resultados de área das regiões dominantes das equipes demonstraram valores superiores para equipe mandante em comparação à visitante na maioria das situações, exceto na metade defensiva quando analisadas as metades do campo e no terço defensivo no caso dos terços do campo, onde as áreas da região dominante foram superiores para as equipes visitantes. Quando analisamos a área das regiões dominantes relativa à área de jogo é possível visualizar o controle espaço-temporal de uma equipe frente à outra, sendo de forma similar encontrados valores superiores das equipes mandantes, com exceção apenas do terço médio do campo, onde não foi encontrada diferença estatística. Esse comportamento de dominância espaço-temporal da equipe mandante frente à visitante pode ser explicado pelo fato de a equipe apresentar vantagem ao jogar em seu próprio estádio, esse fenômeno foi descrito anteriormente para comportamentos técnicos e físicos (Lago-Penas e Lago-Ballesteros, 2011; Aquino *et al.*, 2017). Especificamente, foi demonstrado que equipes mandantes apresentaram, por exemplo, maiores médias de gols marcados, finalizações ao gol, passes, dribles e posse de bola. Além disso, Aquino *et al.* (2017) reportaram que as equipes apresentaram maiores valores de velocidade máxima, velocidade média, bem como ações de alta intensidade em partidas que atuaram como mandante em comparação quando eram a equipe visitante. Esse desempenho físico superior encontrado pode ser relacionado ao nosso achado devido ao fato de que essas variáveis são relacionadas às utilizadas para criação dos modelos de movimento propostos, que por sua vez geram as regiões dominantes dos jogadores e conseqüentemente das equipes. Quando analisamos os resultados das áreas de região dominante e região dominante relativa das equipes nas metades ou terços do campo, ambas as equipes

apresentaram maiores valores no campo defensivo em comparação ao ofensivo, bem como foram visualizados valores superiores no terço médio em relação aos demais e no terço defensivo quando comparado ao ofensivo. Esses resultados são parcialmente similares aos encontrados por Ueda *et al.* (2014) que apresentaram os menores valores médios de área da região dominante das equipes no terço ofensivo do campo (499 a 551 m<sup>2</sup>), seguido pelo terço médio (548 a 746 m<sup>2</sup>) e defensivo (669 a 844 m<sup>2</sup>). Entretanto, é possível visualizar que os valores de área da região dominante das equipes obtidos no presente estudo são inferiores aos encontrados por Ueda *et al.* (2014) em todos os terços do campo, o que possivelmente ocorre pela diferença dos métodos utilizados na determinação da região dominante dos jogadores. Apesar do estudo conduzido por Ueda *et al.* (2014) também utilizar um modelo de movimento para determinar as regiões dominantes, a diferença mais flagrante é que a abordagem foi aplicada como um aperfeiçoamento do diagrama de *Voronoi* e conseqüentemente não considera espaços livres no campo. Nessa abordagem toda a área do campo de jogo é associada como de domínio de algum jogador, gerando valores superiores de área da região dominante e considerando o campo todo como área de jogo permanentemente fixa. Por outro lado, na abordagem proposta no presente estudo, foi inserido o conceito de espaços livres no campo, o que resulta em uma medida de área de jogo que consegue capturar melhor a dinâmica da modalidade. Os resultados obtidos de área de jogo apresentaram valores relativamente pequenos em relação a área total do campo, representando aproximadamente 22% (mediana) da área do campo, com o mínimo de 4% até o máximo de 38%, sugerindo que o jogo se concentra em uma região mais restrita e altera sua localização a cada instante.

#### 5.4 RELAÇÃO DA REGIÃO DOMINANTE DAS EQUIPES COM AÇÕES TÉCNICAS

No intuito de avaliar uma possível relação da região dominante das equipes com eventos técnicos relevantes durante as partidas, foi realizada a análise de correlação entre a região dominante das equipes relativa à área de jogo e o número de desarmes sofridos, finalizações ao gol, passes certos e errados realizados. Quando realizamos essa análise, partimos do pressuposto que as equipes, durante as suas tentativas ofensivas no decorrer das partidas, desejam permanecer com a posse da bola conforme avançam no campo adversário para

atingir seu objetivo marcando um gol. Dessa forma, foram considerados como indicadores mais positivos nessa perspectiva ofensiva menos desarmes sofridos e passes errados realizados, bem como um número maior de passes certos e finalizações ao gol realizados. Os resultados encontrados nessa análise demonstraram que quanto maior a região dominante relativa, ou seja, um maior controle espaço-temporal exercido pela equipe, menor o número de desarmes sofridos e passes errados realizados. No caso da posse de bola, número de passes certos e finalizações ao gol realizados pela equipe foi visualizada uma relação positiva com a região dominante relativa, ou seja, quanto maior o controle espaço-temporal maior os números nesses indicadores. Essas informações sugerem que esse comportamento pode ser associado com uma maior chance de êxito das equipes nas suas tentativas ofensivas. Esse achado foi encontrado de forma similar no estudo conduzido por Rein *et al.* (2017), no qual foi reportado que o maior controle de espaço no terço ofensivo do campo determinado através do diagrama de *Voronoi*, apresentou relação com uma maior probabilidade de as equipes vencerem a partida. Também, Ueda *et al.* (2014) relataram que equipes que foram efetivas nas suas tentativas ofensivas apresentaram maiores valores de área da região dominante no terço médio do campo em comparação as equipes não efetivas. Possivelmente, os achados do presente estudo se devem ao fato que uma maior área de domínio das equipes pode disponibilizar mais opções de passe aos seus jogadores, facilitando esse tipo de ação, o que resultaria em um número maior de passes certos e reduziria os passes errados e desarmes sofridos, auxiliando na manutenção da posse de bola. Outro fator a se destacar é que a área de região dominante das equipes está diretamente ligada às regiões dominantes de seus jogadores, ou seja, esse maior controle espaço-temporal é gerado a partir da exploração espacial do campo realizada pelos jogadores que podem criar oportunidades ocasionando finalizações ao gol.

## 5.5 PERSPECTIVAS FUTURAS

A representação da região dominante proposta no presente estudo se mostrou uma abordagem interessante promovendo informações a respeito do comportamento de exploração espaço-temporal dos jogadores e consequentemente das equipes, entretanto é possível a realização de futuras implementações para

gerar informações ainda mais fiéis aos contextos inerentes da modalidade.

Um exemplo seria a consideração da regra do impedimento durante a determinação da região dominante dos jogadores. A posição de impedimento se caracteriza se o jogador estiver no campo da equipe adversária e qualquer parte do corpo desse jogador, exceto as mãos e os braços, estiver mais próxima da linha do gol adversário do que o penúltimo jogador adversário (The International Football Association Board, 2020). Um jogador que está em posição de impedimento no instante atual possui uma região dominante (que ele tem maior probabilidade de atingir em instantes futuros) em que ele não pode receber a bola efetivamente e conseqüentemente essa região não traz grande benefício para sua equipe. Sendo assim, em uma possível futura implementação deveria se considerar a exclusão de regiões dominantes de jogadores que se encontram em impedimento naquele instante.

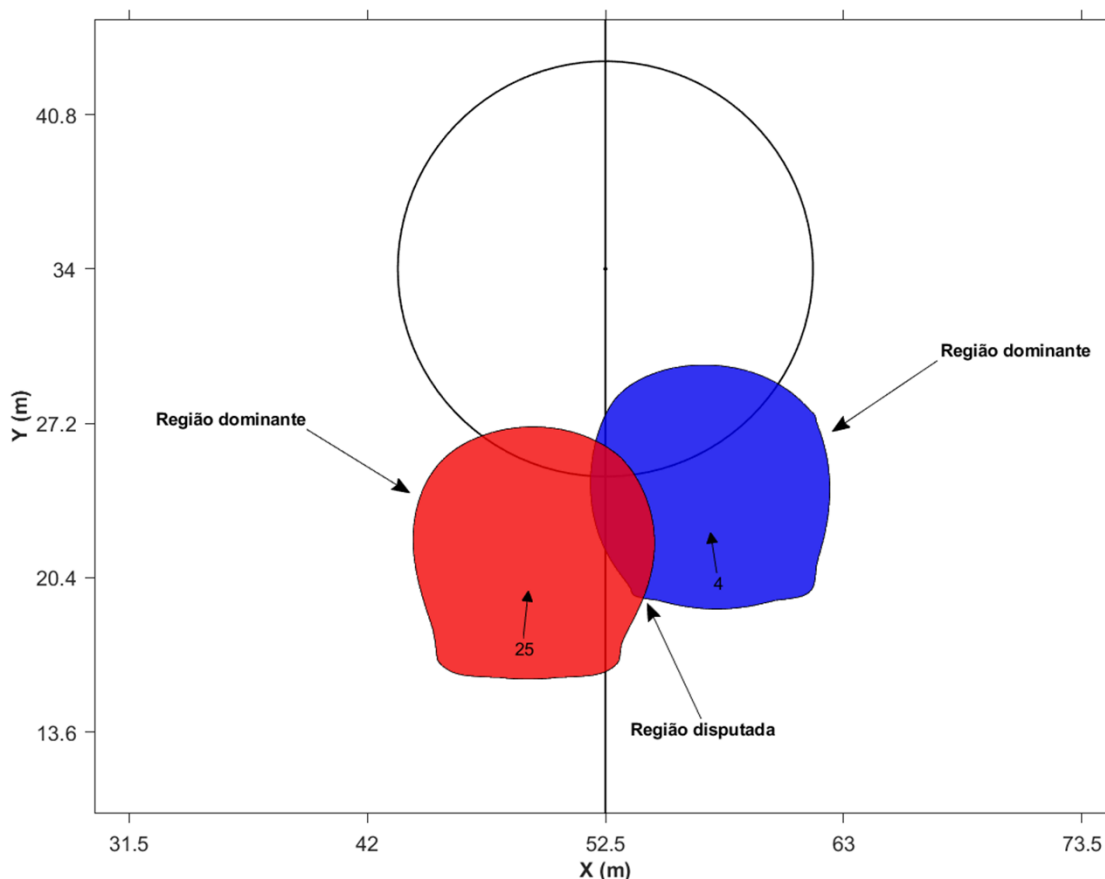
Um outro fator limitante da região dominante do jogador a se considerar seria a interposição de jogadores adversários, ou seja, a região dominante de um jogador ou uma porção dessa região ocorre onde não é viável a recepção da bola porque há um jogador adversário que se encontra entre a região e a localização atual da bola. Entretanto, para a realização dessa implementação deve-se estabelecer primeiramente um parâmetro de interceptação da bola por parte dos jogadores, ou seja, qual o tamanho da região em que um jogador tem probabilidade de interceptar a bola durante uma ação de passe dos seus adversários.

Além disso, na proposta atual todas as regiões dominantes dos jogadores apresentam o mesmo peso na representação, independente da distância do jogador para o gol adversário ou da bola. No entanto, durante jogos simulados foi demonstrado anteriormente que conforme é reduzida a distância dos jogadores para o gol, ocorre um aumento da proximidade entre eles (Clemente *et al.*, 2013). Assim, a bola pode ser considerada como um atrator durante uma partida de futebol, promovendo uma maior concentração de jogadores e disputas nas regiões próximas a localização da bola (McGarry *et al.*, 2002). Essas variáveis, que possivelmente acarretam maior proximidade entre os jogadores, podem promover uma redução na região dominante dos jogadores que se encontram nessas regiões do campo e conseqüentemente os jogadores que estão distantes dessas regiões podem apresentar regiões dominantes maiores, mas com menor relevância prática para a

modalidade. Dessa forma, a ponderação da região dominante dos jogadores de acordo com a distância dos jogadores para a bola parece uma abordagem interessante, utilizada de forma semelhante anteriormente por Filetti *et al.* (2017) para classificação de passes realizados durante as partidas. Entretanto, o presente estudo teve como objeto de interesse especificamente a área das regiões dominantes dos jogadores e equipes, o que dificulta a aplicação dessa estratégia de ponderação nas regiões dominantes porque resultaria em valores de áreas distorcidos que podem não guardar relação com o fenômeno estudado, dificultando a interpretação dos resultados. Outro ponto a se considerar são situações que ocorrem durante as partidas em que jogadores que estão distantes da bola possuem bastante relevância na tentativa ofensiva. Um exemplo dessa situação é quando um jogador está com a bola próximo a linha lateral do campo e seus companheiros de equipe estão mais próximos do gol adversário (distantes da bola). A exploração espaço-temporal dos jogadores que estão nessa região, tanto dos companheiros de equipe quanto dos adversários, possui maior relevância do que a dos jogadores que estão próximos da bola. Sendo assim, futuramente deve-se estabelecer uma estratégia efetiva de ponderação da região dominante dos jogadores com intuito de incluir a relevância do jogador naquele instante em sua representação.

Uma das mais relevantes contribuições da representação proposta no presente estudo foi a inclusão de regiões sem dominância, caracterizadas como espaços livres no campo. Assim, foram determinadas as regiões dominantes que foram associadas aos respectivos jogadores que apresentaram a maior probabilidade de atingirem essas regiões e os espaços livres as regiões em que nenhum jogador possui probabilidade de atingir em instantes futuros. Entretanto, em uma futura implementação é possível considerar além das regiões dominantes dos jogadores e espaços livres, as regiões disputadas (Figura 25) que podem ser consideradas regiões em que ambos os jogadores têm probabilidade de atingir em instantes futuros, possivelmente representando regiões em que os jogadores podem receber a bola com maior segurança e regiões em que eles podem ter dificuldades (maior risco).

**Figura 25** – Exemplo da representação de região dominante dos jogadores levando em consideração a região disputada, apresentada como a sobreposição da região dominante de dois jogadores e o espaço livre apresentado em branco.



**Fonte:** O próprio autor.

Além disso, futuramente a construção de um conjunto de dados maior pode possibilitar gerar modelos de movimentos mais específicos em relação às diferentes posições de jogo (por exemplo, goleiros, zagueiros, meias, atacantes) ou a períodos do jogo (por exemplo, primeiro e segundo tempo da partida). Essas variáveis são relevantes porque apresentam influência sobre o desempenho físico dos jogadores durante as partidas (Barros *et al.*, 2007; Bradley *et al.*, 2009; Dellal *et al.*, 2010), na qual os modelos de movimento são baseados. Assim como pode ser interessante uma análise da relação direta entre o desempenho físico dos jogadores e suas regiões dominantes, por exemplo, se um jogador que apresenta maior desempenho físico também gera maior dominância para sua equipe durante a partida. Um conjunto de dados maior ainda torna possível uma melhor caracterização do comportamento espaço-temporal dos jogadores, como por exemplo, representar características individuais dos jogadores através da

ponderação das suas probabilidades de atingirem regiões futuras baseadas no histórico de preferência desses jogadores em suas tomadas de decisões. Assim como a inclusão dos dados das tomadas de decisão dos jogadores em diferentes situações da partida propiciam considerar conceitos inerentes ao jogo relacionados ao indivíduo, o ambiente e a tarefa. Esse aperfeiçoamento da representação da região dominante nos permite uma análise ainda mais representativa do jogo e conseqüentemente avaliar sua relação com o desempenho das equipes durante as partidas, ou seja, identificar comportamentos associados com situações de êxito esportivo. Finalmente, uma representação de região dominante dos jogadores que possibilita essas caracterizações e associações com desempenho durante as partidas pode ser utilizada como uma ferramenta extremamente valiosa para os técnicos aplicarem no processo de treinamento de tomada de decisão de seus jogadores.

## 6 CONCLUSÃO

No presente estudo apresentamos uma nova representação de região dominante de jogadores de futebol, baseada em um modelo de movimento gerado a partir dos dados de posições, deslocamento, velocidade e vetores de aceleração dos jogadores de partidas oficiais de futebol. Em termos metodológicos, a partir dos dados posicionais dos jogadores oriundos de partidas oficiais foram desenvolvidos modelos de movimento capazes de representar deslocamentos com diferentes características de velocidade e aceleração. Além disso, a partir dos modelos de movimento e probabilidade, desenvolvemos e testamos uma nova representação da região dominante dos jogadores que possibilita a visualização a cada instante das regiões que os jogadores podem atingir antes que os demais em diferentes janelas de tempo futuro, bem como as regiões de espaço livre em que nenhum jogador irá atingir nesses intervalos de tempo. Os resultados obtidos na avaliação da determinação das regiões dominantes dos jogadores nos permitem visualizar valores aceitáveis de predições corretas até em janelas de tempo futuro maiores do que as utilizadas na literatura. As áreas das regiões dominantes dos jogadores determinadas pela abordagem proposta se apresentaram inferiores em comparação as regiões de *Voronoi*, se mostrando mais compatíveis com a capacidade física dos jogadores. Também foi demonstrado que as regiões denominadas como espaço livre representaram uma parte ampla do campo de jogo e conseqüentemente a área de jogo gerada a partir das regiões dominantes se mostrou mais restrita.

Em termos de aplicação, utilizamos a abordagem proposta para determinar a região dominante das equipes considerando o campo todo, bem como as metades e terços do campo. Além disso, avaliamos a relação da região dominante das equipes com as ações técnicas ocorridas durante as partidas. Os principais achados encontrados a respeito das regiões dominantes das equipes demonstraram maior controle espaço-temporal exercido pela equipe mandante em comparação as equipes visitantes em todos os contextos. Quando analisados os campos defensivo e ofensivo, foi visualizado que as equipes possuem uma maior área de domínio em seu próprio campo em comparação ao campo adversário, assim como, quando relativas aos terços do campo, foram apresentados menores valores de região dominante no terço mais próximo ao gol adversário em comparação aos

demais e os maiores valores no terço médio, sugerindo maior exploração nessa região. Além disso, os resultados de correlação das regiões dominantes relativas das equipes com as ações técnicas sugerem que equipes com maior controle espaço-temporal sofrem menos desarmes, bem como realizam mais finalizações ao gol e possuem mais êxito nas ações de passe.

Os resultados alcançados nesse trabalho contribuem para a área acadêmica do ponto de vista do desenvolvimento metodológico da biomecânica juntamente com a matemática e a computação, fornecendo subsídios para a construção de conhecimento no âmbito científico, apresentando informações a respeito da exploração espaço-temporal dos jogadores e equipes durante situações reais da modalidade. Esses achados indicam que o método de representação proposto é um avanço científico-metodológico de forma a se aproximar da dinâmica do jogo e pode ser uma ferramenta útil para analisar a dominância dos jogadores ou equipes durante as partidas de futebol. No nível nacional e nas demais categorias em razão dos profissionais estarem cada vez mais qualificados para análise de jogo, o presente estudo permite análises em que alguns exemplos foram apresentados nesse trabalho, bem como muitas outras possibilidades e até outras modalidades esportivas. Sendo realizadas análises dos elementos do jogo tanto no nível micro quanto no macro, uma vez que todos os jogadores podem ser analisados e conseqüentemente as equipes, podendo o método ser utilizado para analisar as equipes adversárias e auxiliar suas próprias equipes durante as intervenções e planejamento do treinamento tático.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry 1971*, Urbana, Illinois. p.1-18.

AQUINO, R. et al. Influence of Match Location, Quality of Opponents, and Match Status on Movement Patterns in Brazilian Professional Football Players. **J Strength Cond Res**, v. 31, n. 8, p. 2155-2161, Aug 2017. ISSN 1533-4287 (Electronic) 1064-8011 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28737610> >.

ARAÚJO, D.; DAVIDS, K. Team Synergies in Sport: Theory and Measures. **Front Psychol**, v. 7, n. 1449, p. 1449, 2016-September-21 2016. ISSN 1664-1078 (Print) 1664-1078 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27708609> >.

ARAÚJO, D. et al. Decision making in social neurobiological systems modeled as transitions in dynamic pattern formation. **Adapt Behav**, v. 22, n. 1, p. 21-30, 2014. ISSN 1059-7123.

ARAÚJO, D.; SILVA, P.; RAMOS, J. P. Affordance-based decisions guide team synergies during match performance. **PESH**, v. 3, n. 1, 2014. ISSN 1857-8152.

BARROS, R. M. L. et al. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. **J Sports Sci Med**, v. 6, n. 2, p. 233-242, 2007.

BHATTACHARYA, B. B. Maximizing Voronoi Regions of a Set of Points Enclosed in a Circle with Applications to Facility Location. **J Math Model and Algor**, v. 9, n. 4, p. 375-392, 2010. ISSN 1572-9214.

BRADLEY, P. S. et al. High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. **J Sports Sci**, v. 27, n. 2, p. 159-68, Jan 2009. ISSN 0264-0414 (Print) 0264-0414 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19153866> >.

BREFELD, U.; LASEK, J.; MAIR, S. Probabilistic movement models and zones of control. **Mach Learn**, v. 108, n. 1, p. 127-147, 2019/01/01 2019. ISSN 1573-0565. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s10994-018-5725-1> >.

CAETANO, F. G. **Characterization of the interaction between the nearest opponent athletes during football official matches at different levels of competition**. 2016. 95 Master's dissertation Department of Sport Sciences, State University of Londrina, Londrina, PR, Brazil.

CAETANO, F. G. et al. Football player dominant region determined by a novel model based on instantaneous kinematics variables. **Sci Rep**, v. 11, n. 1, p. 18209, Sep 14 2021. ISSN 2045-2322 (Electronic) 2045-2322 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34521897> >.

CAETANO, F. G. et al. Interpersonal interaction during official soccer matches considering the coupling of different playing positions. **Int J Perform Anal Sport**, v. 20, n. 4, p. 646-658, 2020/07/03 2020. ISSN 2474-8668. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/24748668.2020.1775412> >.

CAETANO, F. G. et al. Analysis of match dynamics of different soccer competition levels based on the player dyads. **J Hum Kinet**, v. 70, n. 1, p. 173-182, Dec 2019. ISSN 1640-5544 (Print) 1899-7562 (Electronic) 1640-5544 (Linking). Disponível em: < <http://www.johk.pl/files/1078-2019-69-0005.pdf> >.

CLEMENTE, F. M. et al. Interpersonal dynamics: 1v1 sub-phase at sub-18 football players. **J Hum Kinet**, v. 36, p. 179-89, Mar 2013. ISSN 1640-5544 (Print) 1640-5544 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23717367> >.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educ Psychol Meas**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960. ISSN 0013-1644.

\_\_\_\_\_. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2nd ed. New York: Routledge, 1988. 567 ISBN 0-8058-0283-5.

CUNHA, S. A.; LIMA FILHO, E. C. Metodologia para suavização de dados biomecânicos por função não paramétrica ponderada local robusta. **Rev Bras Biomec**, v. 1, n. 6, p. 23-28, 2003.

DAVIDS, K.; ARAÚJO, D.; SHUTTLEWORTH, R. Applications of dynamical systems theory to football. **Science and football V**, p. 537-550, 2005.

DELLAL, A. et al. Physical and technical activity of soccer players in the French first

league – with special reference to their playing position. **Int SportMed J**, v. 11, n. 2, p. 278-290, 2010.

DUARTE, R. et al. The Ecological Dynamics of 1v1 Sub-Phases in Association Football. **Open Sports Sci J**, v. 3, p. 16-18, 2010. ISSN 1875-399X.

FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J.; BARROS, R. M. L. Background recovering in outdoor image sequences: An example of soccer players segmentation. **Image Vis Comput**, v. 24, n. 4, p. 363-374, 2006a.

\_\_\_\_\_. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. **Comput Vis Image Underst**, v. 101, n. 2, p. 122-135, 2006b.

FILETTI, C. et al. A Study of Relationships among Technical, Tactical, Physical Parameters and Final Outcomes in Elite Soccer Matches as Analyzed by a Semiautomatic Video Tracking System. **Percept Mot Skills**, v. 124, n. 3, p. 601-620, 2017. Disponível em: <  
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0031512517692904> >.

FONSECA, S. et al. Spatial dynamics of team sports exposed by Voronoi diagrams. **Hum Mov Sci**, v. 31, n. 6, p. 1652-9, Dec 2012. ISSN 1872-7646 (Electronic) 0167-9457 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22770973> >.

FONSECA, S. et al. Measuring spatial interaction behavior in team sports using superimposed Voronoi diagrams. **Int J Perform Anal Sport**, v. 13, n. 1, p. 179-189, 2013/04/01 2013. ISSN 2474-8668. Disponível em: <  
<https://doi.org/10.1080/24748668.2013.11868640> >.

FUJIMURA, A.; SUGIHARA, K. Geometric analysis and quantitative evaluation of sport teamwork. **Syst Comp Jpn**, v. 36, n. 6, p. 49-58, 2005. ISSN 0882-1666.

GEERTS, A.; DECROOS, T.; DAVIS, J. **Characterizing Soccer Players' Playing Style from Match Event Streams**. Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics. ECML/PKDD 2018. Lecture Notes in Computer Science. BREFELD, U.; FROMONT, E., et al. Dublin: Springer, Cham: 115-126 p. 2019.

GIBSON, J. J. **The ecological approach to visual perception: classic edition**. New York: Psychology Press, 2014. ISBN 1317579380.

GLAZIER, P. S. Game, set and match? Substantive issues and future directions in performance analysis. **Sports Med**, v. 40, n. 8, p. 625-34, Aug 2010. ISSN 1179-

2035 (Electronic)  
 0112-1642 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20632735> >.

GREHAIGNE, J. F.; BOUTHIER, D.; DAVID, B. Dynamic-system analysis of opponent relationships in collective actions in soccer. **J Sports Sci**, v. 15, n. 2, p. 137-49, Apr 1997. ISSN 0264-0414 (Print)  
 0264-0414 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9258844> >.

HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S. G. **Applied statistics for the behavioral sciences**. 5th. Boston: Houghton Mifflin, 2003. xxi, 756 ISBN 0618124055.  
 Disponível em: < Publisher description  
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1212/2001131503-d.html>  
 Table of contents only <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1212/2001131503-t.html>  
 Contributor biographical information  
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1303/2001131503-b.html> >.

KIM, S. Voronoi Analysis of a Soccer Game. **Nonlinear Anal-Model**, v. 9, n. 3, p. 233-240, 2004.

KOO, T. K.; LI, M. Y. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. **J Chiropr Med**, v. 15, n. 2, p. 155-63, Jun 2016. ISSN 1556-3707 (Print)  
 1556-3707 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27330520> >.

LAGO-PENAS, C.; LAGO-BALLESTEROS, J. Game location and team quality effects on performance profiles in professional soccer. **J Sports Sci Med**, v. 10, n. 3, p. 465-71, 2011. ISSN 1303-2968 (Electronic)  
 1303-2968 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24150619> >.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-74, Mar 1977. ISSN 0006-341X (Print)  
 0006-341X (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/843571> >.

LEES, A.; NOLAN, L. The biomechanics of soccer: a review. **J Sports Sci**, v. 16, n. 3, p. 211-34, Apr 1998. ISSN 0264-0414 (Print)  
 0264-0414 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9596356> >.

LOW, B. et al. A systematic review of collective tactical behaviours in football using positional data. **Sports Med**, v. 50, n. 2, p. 343-385, 2020. ISSN 1179-2035.

MCGARRY, T. et al. Sport competition as a dynamical self-organizing system. **J Sports Sci**, v. 20, n. 10, p. 771-81, Oct 2002. ISSN 0264-0414 (Print) 0264-0414 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12363294> >.

MEMMERT, D. et al. A tactical comparison of the 4-2-3-1 and 3-5-2 formation in soccer: A theory-oriented, experimental approach based on positional data in an 11 vs. 11 game set-up. **PLoS One**, v. 14, n. 1, p. e0210191, 2019. ISSN 1932-6203 (Electronic) 1932-6203 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30699148> >.

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

NARIZUKA, T.; YAMAZAKI, Y.; TAKIZAWA, K. Space evaluation in football games via field weighting based on tracking data. **Sci Rep**, v. 11, n. 1, p. 5509, Mar 9 2021. ISSN 2045-2322 (Electronic) 2045-2322 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33750889> >.

NEWELL, K. Constraints on the development of coordination. **Motor development in children: Aspects of coordination and control**, 1986.

OKABE, A.; BOOTS, B. N.; SUGIHARA, K. O. **Spatial tessellations : concepts and applications of Voronoi diagrams**. Chichester: Wiley, 1992. x, 532 p. ISBN 0471934305. Disponível em: <  
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0607/91047687-d.html> >.

PARLEBAS, P. Motor praxeology: a new scientific paradigm. In: VACZI, M. (Ed.). **Playing Fields: Power, Practice, and Passion in Sport**. 8th ed. Reno: Center for Basque Studies, 2013. p.127-144. ISBN 78-1-935709-49-7.

REILLY, T. **The science of training—soccer: A scientific approach to developing strength, speed and endurance**. Routledge, 2007. ISBN 1134222718.

REILLY, T.; GILBOURNE, D. Science and football: a review of applied research in

the football codes. **J Sports Sci**, v. 21, n. 9, p. 693-705, Sep 2003. ISSN 0264-0414 (Print)  
0264-0414 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14579867>>. Acesso em: 2015/10/10.

REIN, R.; RAABE, D.; MEMMERT, D. "Which pass is better?" Novel approaches to assess passing effectiveness in elite soccer. **Hum Mov Sci**, v. 55, p. 172-181, Oct 2017. ISSN 1872-7646 (Electronic)  
0167-9457 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28837900>>.

RIC, A. et al. Dynamics of tactical behaviour in association football when manipulating players' space of interaction. **PLoS One**, v. 12, n. 7, p. e0180773, 2017. ISSN 1932-6203 (Electronic)  
1932-6203 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28708868>>.

RICO-GONZALEZ, M. et al. Identification, Computational Examination, Critical Assessment and Future Considerations of Spatial Tactical Variables to Assess the Use of Space in Team Sports by Positional Data: A Systematic Review. **J Hum Kinet**, v. 77, p. 205-221, Jan 2021. ISSN 1640-5544 (Print)  
1640-5544 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34168705>>.

RIENZI, E. et al. Investigation of anthropometric and work-rate profiles of elite South American international soccer players. **J Sports Med Phys Fitness**, v. 40, n. 2, p. 162-9, Jun 2000. ISSN 0022-4707 (Print)  
0022-4707 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11034438>>.

ROSENTHAL, R. Parametric measures of effect size. In: COOPER, H. M. e HEDGES, L. V. (Ed.). **The handbook of research synthesis**. New York: Russell Sage Foundation, 1994. cap. 16, p.231-244. ISBN 0-87154-226-9.

SAVELSBERGH, G. J. P.; WHITING, H. T. A.; PIJPERS, J. R. The Control of Catching. In: SUMMERS, J. J. (Ed.). **Advances in Psychology**. Amsterdam: North-Holland, v.84, 1992. cap. 11, p.313-342. ISBN 0166-4115.

STOLEN, T. et al. Physiology of soccer: an update. **Sports Med**, v. 35, n. 6, p. 501-36, 2005. ISSN 0112-1642 (Print)  
0112-1642 (Linking). Disponível em: <  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15974635>>.

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

TAKI, T.; HASEGAWA, J. Visualization of dominant region in team games and its application to teamwork analysis. *Proceedings Computer Graphics International 2000*, 2000, 19-24 June 2000. p.227-235.

THE INTERNATIONAL FOOTBALL ASSOCIATION BOARD. **Laws of the Game 2014/15**. Zurich, Switzerland: The International Football Association Board 2014.

\_\_\_\_\_. **Laws of the Game 2020/21**. Zurich, Switzerland: The International Football Association Board 2020.

TOMCZAK, M.; TOMCZAK, E. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. **Trends Sport Sci**, v. 21, n. 1, p. 19-25, 2014. ISSN 2299-9590.

UEDA, F.; MASAOKI, H.; HIROYUKI, H. The causal relationship between dominant region and offense-defense performance—focusing on the time of ball acquisition. **Football Science**, v. 11, p. 1-17, 2014.

## GLOSSÁRIO

**Aceleração:** Taxa de variação da velocidade.

**Ângulo de deslocamento:** Ângulo formado pela posição em um dado instante e o instante seguinte em relação ao horizonte.

**Calibração:** Processo computacional para transformação de coordenadas de tela em coordenadas reais.

**Coordenada bidimensional:** Posição de um dado jogador em função do tempo em relação a um sistema de referência.

**Deslocamento:** Mudança da posição ou distância orientada entre as localizações inicial e final.

**Diagrama de Voronoi:** Método matemático de decomposição de um dado espaço.

**Homografia:** Procedimento de relação de correspondência matemática entre um conjunto de pontos pertencentes a um plano do mundo real com um conjunto de pontos pertencentes a imagem.

**Janela de tempo futuro:** Intervalo de tempo entre um dado instante e um ponto futuro.

**Modelo de movimento:** Acumulado de deslocamentos de uma dada velocidade, aceleração e um intervalo de tempo.

**Modelo de probabilidade:** Conjunto de probabilidades de um dado jogador em um instante e posição atingir cada região do campo.

**Rastreamento:** Processo computacional para registro da posição do jogador em função do tempo.

**Região dominante:** Região do campo onde um jogador consegue atingir antes que os demais.

**Segmentação:** Método de processamento de imagem para identificar objetos de interesse na imagem.

**Sincronização:** Processo para eliminar defasagem temporal entre sinais de vídeos de diferentes câmeras.

**Sistema de referência:** Sistema de coordenadas de pontos específicos do plano no qual o movimento ocorre que possibilita o registro de grandezas físicas.

**Suavização:** Processo computacional de remoção de ruídos dos sinais.

**Velocidade:** Taxa de variação da posição.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

## Football player dominant region determined by a novel model based on instantaneous kinematics variables

www.nature.com/scientificreports

scientific reports



OPEN

## Football player dominant region determined by a novel model based on instantaneous kinematics variables

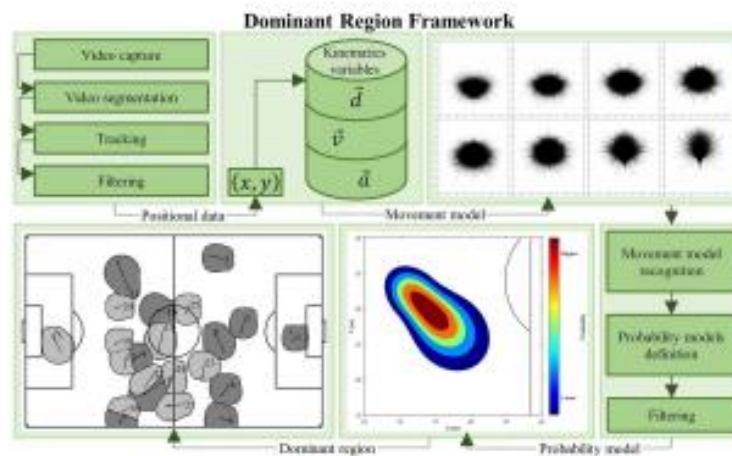
Fabio Giuliano Caetano<sup>1,2</sup>, Sylvio Barbon Junior<sup>2</sup>, Ricardo da Silva Torres<sup>3</sup>, Sergio Augusto Cunha<sup>4</sup>, Paulo Régis Caron Ruffino<sup>5</sup>, Luiz Eduardo Barreto Martins<sup>4</sup> & Felipe Arruda Moura<sup>1</sup>

Dominant regions are defined as regions of the pitch where a player can reach before any other and are commonly determined without considering the free-spaces in the pitch. We presented an approach to football players' dominant regions analysis, based on movement models created from players' positions, displacement, velocity, and acceleration vectors. 109 Brazilian male professional football players were analysed during official matches, computing over 15 million positional data obtained by video-based tracking system. Movement models were created based on players' instantaneous vectorial kinematics variables, then probabilities models and dominant regions were determined. Accuracy in determining dominant regions by the proposed model was tested for different time-lag windows. We calculated the areas of dominant, free-spaces, and Voronoi regions. Mean correct predictions of dominant region were 96.56%, 88.64%, and 72.31% for one, two, and three seconds, respectively. Dominant regions areas were lower than the ones computed by Voronoi, with median values of 73 and 171 m<sup>2</sup>, respectively. A median value of 5537 m<sup>2</sup> was presented for free-space regions, representing a large part of the pitch. The proposed movement model proved to be more realistic, representing the match dynamics and can be a useful method to evaluate the players' tactical behaviours during matches.

Football is a team sport characterised as a sociomotor physical activity that involves cooperative (with teammates) and competitive (with opponents) interactions, as well as, environmental uncertainties<sup>1</sup>. These relationships among the players show a behaviour previously reported to animals on the ecological approach<sup>2</sup> applied in team sports to understand team synergies<sup>3</sup>, in which they perceive the environment around them and adapt accordingly. The environmental constraints<sup>4</sup> in the case of football, for example, are the teammates or opponent players, the pitch, and the ball. Thus, players experience a perception-action process in which they make decisions based on the actions of their neighbour players, as well as their actions also affect the neighbour players<sup>5,6</sup>.

The interactions among neighbouring players are a relevant concept to evaluate the use of space by the teams and competition for the pitch regions because it has been used to compute the players' dominant regions<sup>7</sup>. The player dominant region is defined as the pitch region where he/she can reach before any other player<sup>8</sup> and is commonly determined based on Voronoi diagram<sup>7</sup>. The Voronoi tessellations allows the decomposition of a space (e.g., the pitch) into cells (e.g., dominant regions) associated with each point (e.g., players)<sup>7</sup>. This method was applied to determine the players' dominant region in the football considering the players' positions and the distance between the players to the nearby players<sup>10</sup>. Then, Filetti, et al.<sup>11</sup> applied a different Voronoi diagram<sup>12</sup> that resulted in dominant regions with rounded characteristics. However, the dominant regions determined by Voronoi diagrams<sup>10,11</sup> are associated with the players because they are the closest<sup>13</sup>, and promote a static perspective that can be representative only of an instant.

<sup>1</sup>Laboratory of Applied Biomechanics, Department of Sport Sciences, Centre of Physical Education and Sport, State University of Londrina, Km 380 Celso Garcia Cid Road, University Campus, Londrina, Paraná 86057-970, Brazil. <sup>2</sup>Department of Computer Science, State University of Londrina, Londrina, Brazil. <sup>3</sup>Department of ICT and Natural Sciences, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Ålesund, Norway. <sup>4</sup>Department of Sport Sciences, University of Campinas, Campinas, Brazil. <sup>5</sup>Department of Mathematics, University of Campinas, Campinas, Brazil. <sup>✉</sup>email: fabiogcaetano@gmail.com

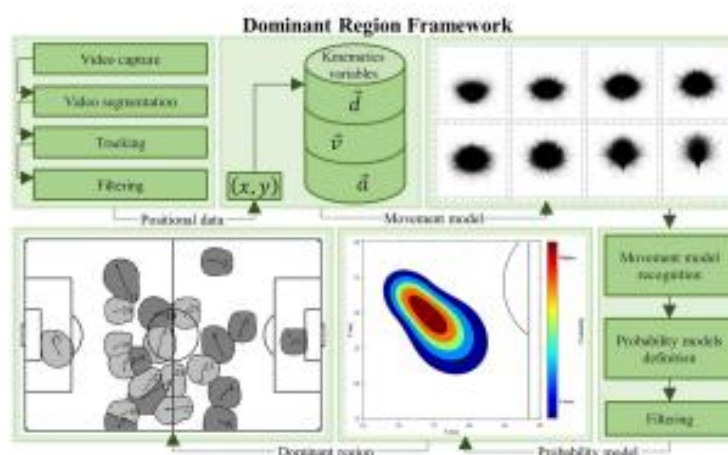


**Figure 1.** Representation of dominant region framework of our approach, from positional data collection, movement models creation, probability models definition, until to players dominant region determination.

Therefore, researchers proposed the use of movement models defined as a set of displacement, velocity, and acceleration data used to represent the players' movement abilities<sup>8</sup>. Initially, a movement model was created considering the position, displacement, and velocity of the players improving the determination of the dominant region, making it more compatible with human physical capacity<sup>8,24</sup>. Then, an improvement of the movement model was proposed, by adding a resistive force to avoid the velocity increase up to infinity, caused by the acceleration considered as a constant<sup>25,26</sup>. However, the players' dominant regions like other tactical behaviours in the football (e.g., distance between players, teams effective playing space) can be influenced by several match situations<sup>27</sup>. Thus, a recent study<sup>17</sup> developed the probabilistic movement model based on the players' positional data from an official match to determine the dominant regions with even more realism. The probabilistic movement model proposed<sup>17</sup> considers the players' position, displacement, and velocity to determine the dominant regions in a time-lag window of one second. Beefeld, et al.<sup>17</sup> used the velocity discriminated into five different speed intervals (Stand, Walk, Jog, Run, and Sprint), considered the playing positions to generate the movement models and computed the probabilities of the players to reach a given position over time.

The studies using movement models<sup>8,24-27</sup> can capture the dynamical characteristics of human displacement, elucidating the relevance of the players' kinematic variables to determine their dominant regions. In the dominant regions, these studies represent the environment of dynamical changes that occur in a football match, previously neglected using the most straightforward Voronoi diagram. However, there is still an overestimation in the players' dominant region, as Voronoi diagram, because all the pitch regions are associated with a player. For those literature models<sup>8,24-27</sup>, every region of the pitch is dominated by a given player and there are no free spaces, which is a limitation of the proposals presented that can lead to unsuitable interpretations about the playing space analyses. Thus, proposals based on Voronoi illustration attribute huge players area, intuitively unreal for football players. Thus, our purpose was to determine a novel dominant region calculation based on a movement model that considers players' positions, displacement, velocity, and acceleration vectors obtained from official matches data. The novelty of our approach is that it considers the pitch regions that the player is unable to reach in a specific time interval are considered free spaces and not as their dominant region. Our proposal promotes information about players dominant regions even more compatible with human physical capacity and makes visible the free spaces in the pitch. Furthermore, inspired by Taylor's Formula of order two, this article improves previous approaches by considering the statistics of the second order of the kinematics variables, namely, the acceleration. We believe that displacements with different accelerations, such as positive and negative accelerations, cannot fit into the same movement model, then in our approach several movement models would be generated.

Thus, our proposal is grounded by probabilities models with real instantaneous kinematic variables as input to determine the dominant regions (Fig. 1). In addition, we evaluated the accuracy in determining the players' dominant regions in different time-lag windows and computed areas of dominant regions and free spaces. Finally, we compared the area of the dominant regions determined by our model and Voronoi diagram. Our initial hypotheses were that (1) the greatest accuracy would be presented in the smallest time-lag window compared to bigger ones; (2) the area of the dominant regions determined through our model would be more realistic to represent the match dynamics and smaller than the dominant regions determined by the Voronoi diagram.



**Figure 1.** Representation of dominant region framework of our approach, from positional data collection, movement models creation, probability models definition, until to players dominant region determination.

Therefore, researchers proposed the use of movement models defined as a set of displacement, velocity, and acceleration data used to represent the players' movement abilities<sup>5</sup>. Initially, a movement model was created considering the position, displacement, and velocity of the players improving the determination of the dominant region, making it more compatible with human physical capacity<sup>8,14</sup>. Then, an improvement of the movement model was proposed, by adding a resistive force to avoid the velocity increase up to infinity, caused by the acceleration considered as a constant<sup>23,26</sup>. However, the players' dominant regions like other tactical behaviours in the football (e.g., distance between players, teams effective playing space) can be influenced by several match situations<sup>27</sup>. Thus, a recent study<sup>17</sup> developed the probabilistic movement model based on the players' positional data from an official match to determine the dominant regions with even more realism. The probabilistic movement model proposed<sup>17</sup> considers the players' position, displacement, and velocity to determine the dominant regions in a time-lag window of one second. Brefeld, et al.<sup>17</sup> used the velocity discriminated into five different speed intervals (Stand, Walk, Jog, Run, and Sprint), considered the playing positions to generate the movement models and computed the probabilities of the players to reach a given position over time.

The studies using movement models<sup>8,14-17</sup> can capture the dynamical characteristics of human displacement, elucidating the relevance of the players' kinematic variables to determine their dominant regions. In the dominant regions, these studies represent the environment of dynamical changes that occur in a football match, previously neglected using the most straightforward Voronoi diagram. However, there is still an overestimation in the players' dominant region, as Voronoi diagram, because all the pitch regions are associated with a player. For those literature models<sup>8,14-17</sup>, every region of the pitch is dominated by a given player and there are no free spaces, which is a limitation of the proposals presented that can lead to unsuitable interpretations about the playing space analyses. Thus, proposals based on Voronoi illustration attribute huge players area, intuitively unreal for football players. Thus, our purpose was to determine a novel dominant region calculation based on a movement model that considers players' positions, displacement, velocity, and acceleration vectors obtained from official matches data. The novelty of our approach is that it considers the pitch regions that the player is unable to reach in a specific time interval are considered free spaces and not as their dominant region. Our proposal promotes information about players dominant regions even more compatible with human physical capacity and makes visible the free spaces in the pitch. Furthermore, inspired by Taylor's Formula of order two, this article improves previous approaches by considering the statistics of the second order of the kinematics variables, namely, the acceleration. We believe that displacements with different accelerations, such as positive and negative accelerations, cannot fit into the same movement model, then in our approach several movement models would be generated.

Thus, our proposal is grounded by probabilities models with real instantaneous kinematic variables as input to determine the dominant regions (Fig. 1). In addition, we evaluated the accuracy in determining the players' dominant regions in different time-lag windows and computed areas of dominant regions and free spaces. Finally, we compared the area of the dominant regions determined by our model and Voronoi diagram. Our initial hypotheses were that (1) the greatest accuracy would be presented in the smallest time-lag window compared to bigger ones; (2) the area of the dominant regions determined through our model would be more realistic to represent the match dynamics and smaller than the dominant regions determined by the Voronoi diagram.

## Methods

**Participants.** A total of 109 Brazilian male professional football players was analysed in this study during four official matches of the 2014 Série A2 of the São Paulo State league resulting in 15,112,163 positional data samples. The matches occurred in non-congested periods (at least 72 h after the previous match), with temperature from 23.2 up to 35.2 °C, relative humidity from 34 up to 86% (according with the National Institute of Meteorology—INMET—Brazil). All matches were performed in accordance with Federation Internationale de Football Association (FIFA) rules, in official stadiums (natural grass, ~105 × 68 m). This study was conducted in agreement with ethical recommendations of the Declaration of Helsinki, informed consent was obtained for players data collection and was approved by the Research Ethics Committee of the University of Campinas of Medical Sciences (Protocol #299797418.2.0000.5404).

**Data collection.** Four digital video cameras recorded the matches' images at a resolution of 640 × 480 pixels and an acquisition frequency of 30 Hz. The cameras remained fixed throughout the match at the highest points of the stadiums. After the matches, the video sequences were transferred to a computer and synchronised by identifying specific events in an overlapping region between the cameras.

The players' positional data during the matches were obtained by videogrammetry (DVideo, v6.02, Campinas, Brazil, [www.fef.unicamp.br/fefflaboratorios/lib](http://www.fef.unicamp.br/fefflaboratorios/lib)) using the basic automatic procedures of segmentation, splitting blobs, and tracking<sup>18–21</sup>. The automatic tracking rate of DVideo software was 94% with the remaining processed frames solved manually by an experienced operator. The average error for determination of the player position and the distance covered was 0.3 m and 1.4%, respectively<sup>18–20</sup>. The maximal estimated error<sup>21</sup> for velocity and acceleration was 1.4% and 2.8%, respectively. The reference coordinate system associated with the pitch was defined from bidimensional real-world coordinates, in meters, of 36 specific points on the pitch measured by a measuring tape before the matches. The image plane coordinates were determined through identification of the corresponding projections of these points in the image via the interface of DVideo software. The players' bidimensional coordinates relative to the pitch's coordinate system were obtained by the homography parameters of the image-object transformation calculated based on the direct linear transformation method<sup>22</sup>. The players' trajectories were filtered using a third-order Butterworth low-pass with a cut-off frequency of 0.4 Hz defined by spectral and residual analyses, based on a previously proposed protocol<sup>18,23</sup>.

**Data analysis.** *Movement models.* The movement models were created based on the vectorial kinematics variables of the players obtained during three matches: the instantaneous displacement angles in relation to the longitudinal axis (θ<sub>d(i)</sub>; Eq. 1), velocities (v<sub>(i)</sub>; Eq. 2), and accelerations (a<sub>(i)</sub>; Eq. 3), derived from the players' positions as a function of time.

$$\theta_{d(i)} = \tan^{-1} \left( \frac{y_{(i+1)} - y_{(i)}}{x_{(i+1)} - x_{(i)}} \right), i = 1, \dots, n - 1 \quad (1)$$

$$v_{(i)} = \sqrt{\left( \frac{x_{(i+1)} - x_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}} \right)^2 + \left( \frac{y_{(i+1)} - y_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}} \right)^2}, i = 2, \dots, n - 1 \quad (2)$$

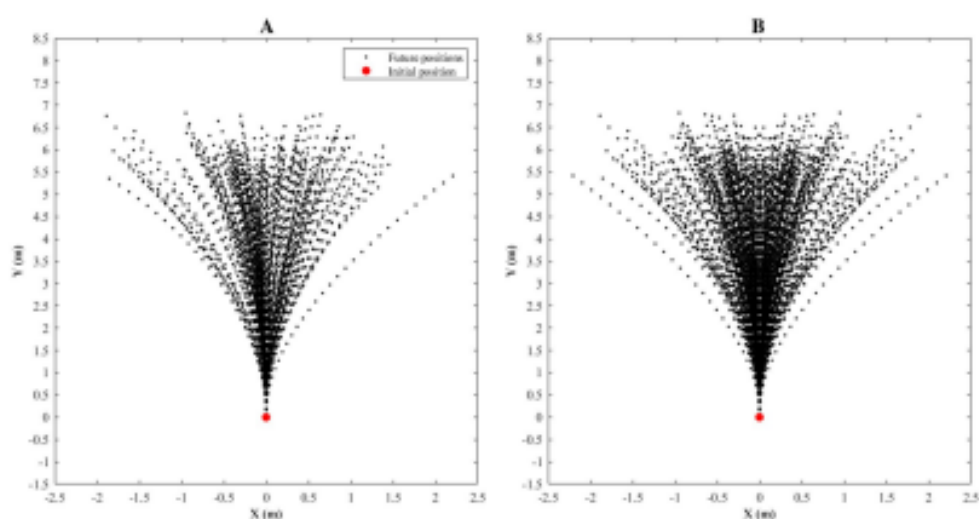
$$a_{(i)} = \frac{v_{(i+1)} - v_{(i-1)}}{t_{(i+1)} - t_{(i-1)}}, i = 2, \dots, n - 1 \quad (3)$$

where  $x$  and  $y$  are the bidimensional coordinates,  $i$  indicates the instant of time,  $n$  is the total number of frames, and  $t$  is the timestamp, in seconds.

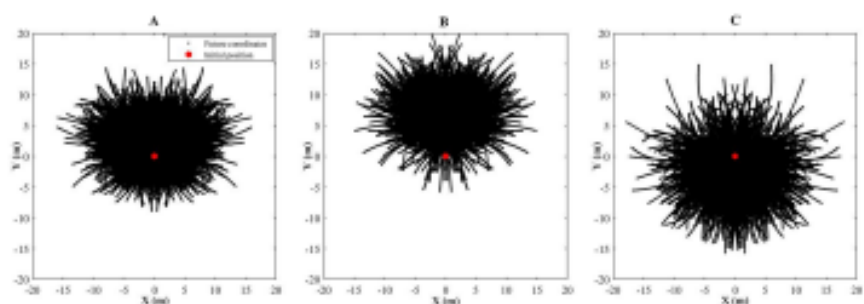
We identified the position, displacement, velocity, and acceleration at each instant of time and registered the positions at the future points up to three seconds. The time window for the future positions was chosen based on an experiment with the notational dataset of three matches resulting 2948 passes analysed. This experiment was based on the players' behaviour when performing passing actions. The player in possession of the ball perceives the environment (e.g., the displacements of other players) and sees the opportunity to pass the ball to a teammate. This phenomenon is described as affordance<sup>24</sup>. The players try to perform a pass to a region of control to their teammate, commonly to where he/she is moving toward. Players estimate the region that their teammate can reach in a future time intuitively, a behaviour already described by motor control researches in the interception tasks<sup>25</sup>. Only the successful passes were analysed, i.e., passes that reached the teammate, to ensure that situations which the players have the intention to intercept the ball or clearance actions are excluded from analysis. We identified the moment that the player performed the pass and the moment that his teammate received the ball. Next, we computed the time window between these instants for all passes. Finally, the distribution of these time windows was analysed, and the maximal future time window of three seconds was determined, which represented roughly 95% of the data. ( $n = 2948$ ; 25th percentile = 1.03 s; 50th percentile = 1.40 s; 75th percentile = 1.86 s; 95th percentile = 3.16 s).

The displacement angles were rotated 90 degrees, translated to origin in 0 at  $x$  and  $y$  axis (θ<sub>r</sub> and θ<sub>f</sub>; Eqs. 4 and 5), and the displacements were mirrored (Fig. 2) around the  $y$  axis to balance the curvatures in both sides (mθ<sub>f</sub>; Eqs. 6).

$$\theta_r = \begin{cases} 90 + \text{abs}(\theta_d), & \theta_d < 0 \\ 90 - \theta_d, & \theta_d \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$



**Figure 2.** Example of displacements with velocities from 5 to 6 m/s, acceleration from 2 to 3 m/s<sup>2</sup>, and angles rotated 90 degrees and translated to origin in 0 at x and y axis future positions at one-second time window generating a movement model (A) and the same movement model after mirroring process (B).



**Figure 3.** Example of displacements with velocities of 1 m/s at initial instant and future positions at three-seconds time window with accelerations from 0 to 1 m/s<sup>2</sup> (A), from 3 to 4 m/s<sup>2</sup> (B), and negative accelerations from 3 to 4 m/s<sup>2</sup> (C).

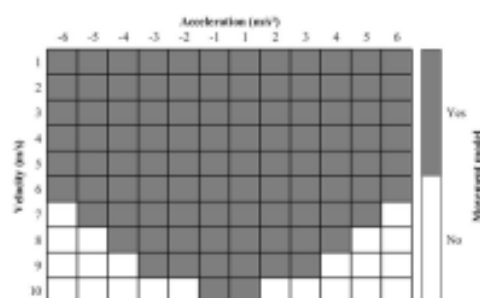
$$\hat{P}_{(i)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{(i)} - x_1 \\ y_{(i)} - y_1 \end{bmatrix}, i = 1, \dots, 90 \quad (5)$$

where the  $x$  and  $y$  indicate the bidimensional coordinates,  $i$  refers to an instant of time, and  $x_1$  and  $y_1$  are the initial bidimensional coordinates.

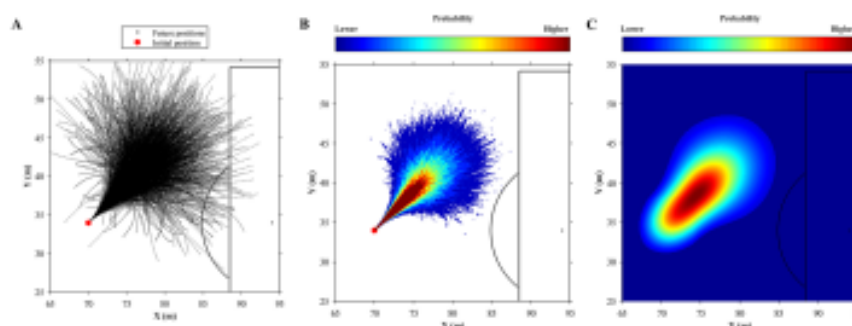
$$mfp = \begin{bmatrix} \hat{P}_x & \hat{P}_y \\ \hat{P}_x' & \hat{P}_y' \end{bmatrix} \quad (6)$$

The players' positions considering different time-lags were stored in a matrix, i.e., each cell of this matrix is a movement model (Fig. 3) that correspond the specific combination of velocity (0 up to 10 m/s) and acceleration ranges (-6 up to 6 m/s<sup>2</sup>) stepping by 1 m/s and 1 m/s<sup>2</sup> (Fig. 4).

**Probability models.** The instantaneous displacement, velocity, and acceleration of players were identified, the respective movement model was recognized, rotated to displacement direction, and translated to actual position of the player (Fig. 5A). The probabilities of a player achieving any region in the pitch were calculated ( $p$ ; Eq. 7) by histogram function with probability density function normalisation (Fig. 5B).



**Figure 4.** Matrix chart representation of the velocity and acceleration data samples that were used to create their specific movement models according to each range, the combination of velocity and acceleration ranges that generated a movement model are indicated by the gray cells.



**Figure 5.** Example of movement model with velocity from 5 to 6 m/s, acceleration from 2 to 3 m/s<sup>2</sup>, and three-seconds future time window rotated and translated to player's actual displacement at instant time (A), probabilities of the player achieving any region in the pitch calculated from this movement model (B), and probability model after smoothing process (C).

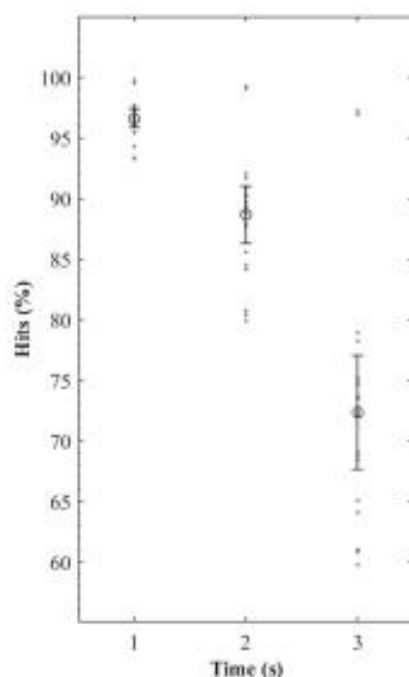
$$pr(i,j) = \frac{c_{i,j}}{N \times A}, i = 1, \dots, 680, j = 1, \dots, 1050 \quad (7)$$

where  $i$  and  $j$  are respectively, the matrix's rows and columns,  $c$  indicates the number of elements in the region,  $N$  is the total number of elements, and  $A$  is the area of the region.

The grid used to determine the probabilities range to 0 up to 105 m (x) and 0 up to 68 (y) with a resolution of 0.1 m, generated a matrix (680 × 1050) in which each cell corresponds to probability value of specific region (0.01 m<sup>2</sup>) of the pitch. The matrix's probability values were smoothed (Fig. 5C) using a 2-D Gaussian filter to reduce the discrete characteristics of the histogram results, improving the spatial coherence, similar to previously applied by Geerts, et al.<sup>28</sup>. The standard deviation ( $\sigma = 20$ ) of the filter was chosen by analyses of the results obtained for all the movement models with different  $\sigma$  values, to ponder the region probability value from neighbouring regions, preserving the edges and boundaries. The probability models have values ranging from 0 up to 1. Values below 0.001 were rounded to 0 to avoid an association with the very low probability regions with the players' dominant regions.

**Dominant regions.** The dominant regions in each timestamp were determined by comparing the probability matrices of all players in each instant of time. Thus, each cell of the matrices was compared and registered to the player with greater probability value, resulting in a matrix representing the pitch with the player's identifier as dominant of each region. The regions with probability values equal to 0 for all players were not associated with any player, and these non-associated regions were defined as free-spaces regions.

The accuracy on determination of the dominant regions was tested for a new dataset: 22 players during the first half of a match (1,856,030 position data samples) that was not used to create the movement models. We measured the accuracy by comparing the dominant region determined for the player at instant time (0.033 s) and the real position of this player at one (T1), two (T2), and three (T3) seconds lag. When the real positions coincided with a region associated with each player, we computed as a correct prediction and the relative frequencies of corrects predictions were calculated. We calculated the areas of the dominant regions and free-spaces



**Figure 6.** Representation of means (circles), standard deviations (bars), and individual values (dots) of percentage hits in determining players' dominant regions (future positions coincided with a region associated with them) at different future time windows (one-, two-, and three-seconds lag).

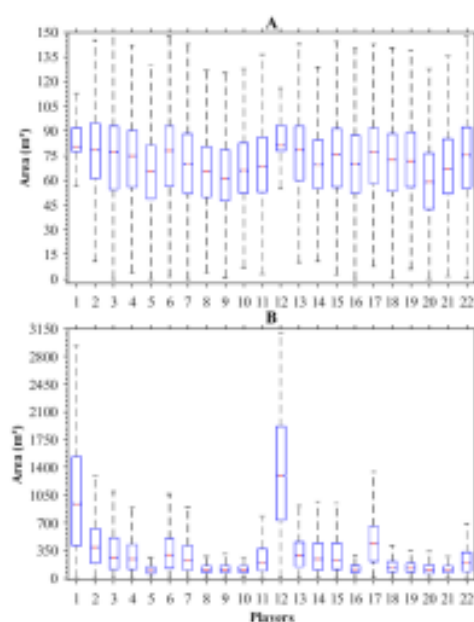
with three seconds time-lag in the same dataset used for the accuracy test. The sum of the regions associated with each player resulted in each player dominant region area, as well as the sum of the non-associated regions resulted in the area values of the free-spaces regions.

**Voronoi regions.** The Voronoi diagram was previously proposed by Kim<sup>27</sup> to determine players' dominant regions. Using the players' bidimensional coordinates, the Voronoi polygons were defined containing the pitch regions that are closest to each player compared to anyone. The areas of the polygons were calculated to obtain the players' dominant regions (Voronoi regions) at each instant of time. These procedures were performed using the same dataset that we calculate the areas of the dominant regions determined by our model to enable the comparison between the approaches.

**Statistical analysis.** The normality of data distribution was verified by Lilliefors test, then parametric or non-parametric statistics methods are applied accordingly. The percentage of correct predictions are presented in mean and standard deviation, and the dominant region areas are presented in median and interquartile range. Furthermore, we calculated the 95% confidence interval (CI) with lower limit (LL) and upper limit (UL) of means and medians. The Wilcoxon Rank Sum Test was used to compare the players' dominant regions determined by our proposed model and players' Voronoi regions, followed by the calculation of the effect size ( $r$ ) according to proposed by Rosenthal<sup>28</sup> and classifications were adopted according to the proposal of Cohen<sup>29</sup>. The statistical significance was set as  $P < 0.05$ .

## Results

As reported before, the correct predictions were computed when the players' real future positions coincided with a region associated with them. The means, standard deviations, and individual values of percentage of correct predictions for T1, T2, and T3 for all players are presented in Fig. 6. The greater values of correct predictions were obtained for the lower time window. The mean percentage of correct prediction found for T1 was 96.56% (95% CI: 0.62; LL: 95.94; UL: 97.17), for T2 88.64% (95% CI: 1.90; LL: 86.74; UL: 90.54), and for T3 72.31% (95% CI: 3.76; LL: 68.55; UL: 76.07).



**Figure 7.** Boxplots represent median (red bars), 25th and 75th percentile (blue boxes), minimum and maximum (black bars) of the dominant region areas ( $\text{m}^2$ ) determined by our movement model (A) and Voronoi regions (B) of each player.

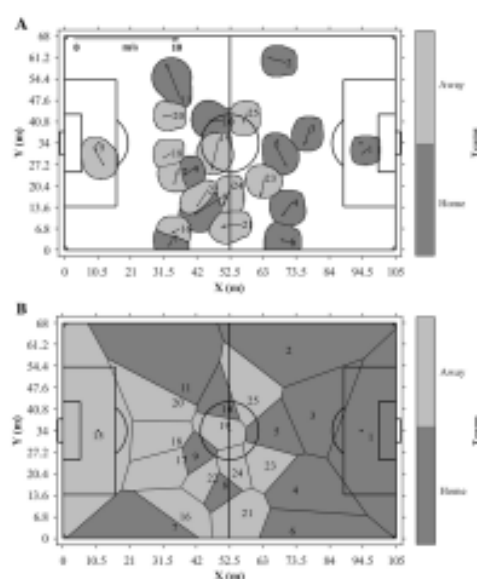
Figure 7 presents boxplots representing the area of dominant regions determined by our movement model (Fig. 7A) and Voronoi regions (Fig. 7B) of each player. The experimental results showed that the players' dominant regions areas determined by our movement model are lower than Voronoi regions ( $P < 0.01$ ;  $r = 0.53$ ; Medium). The median area of the players' dominant regions determined by our movement model was  $73 \text{ m}^2$  (95% CI: 0.04; LL: 73.09; UL: 73.17) and interquartile range of  $35 \text{ m}^2$  (P25%: 54; P75%: 89). The median area of the players' Voronoi regions was  $171 \text{ m}^2$  (95% CI: 0.37; LL: 170.74; UL: 171.49) with the interquartile range of  $324 \text{ m}^2$  (P25%: 88; P75%: 411).

Additionally, Fig. 8 shows an example of the dominant regions for all players determined at a given instant time by our movement model (Fig. 8A) and using the Voronoi diagram (Fig. 8B). Figure 8A makes it possible to visualize the free-spaces regions generated by our movement model. The area of these regions was computed, and the median area of free spaces was  $5,537 \text{ m}^2$  (95% CI: 1.85; LL: 5,535.11; UL: 5,538.81) and interquartile range of  $342 \text{ m}^2$  (P25%: 5,371; P75%: 5,712), with minimum of  $4,677 \text{ m}^2$  and maximum of  $6,476 \text{ m}^2$ . Intuitively, from the model proposed in the present study, it is possible to visualize a more realistic space sharing among the players considering football as an invasion sport.

## Discussion

The purpose of this study was to propose a novel model to calculate football players' dominant regions based on players' kinematics variables during real matches situations and present the area of dominant regions and free spaces on the pitch. We analysed the accuracy in the determining the players' dominant regions in different time-lag windows (T1, T2, and T3) and compared the area of dominant regions determined by our movement model and Voronoi regions. The main findings demonstrated an overall high accuracy, but lower values for the dominant regions determined at T3 time-lag. Additionally, Voronoi regions presented greater area values. These results corroborate our initial hypothesis that suggested greater accuracy in the smallest future time windows movement model than the Voronoi regions.

The accuracy of the players' dominant regions determination enables to verify if the players were in the regions predicted. The main findings showed an expected reduction of accuracy when the time-lag window increases because predicting events that occur in the shortest time can be more precise. This behaviour possibly occurs due the dynamic nature of football, in which the actions of one player are influenced by the movements of the other players or balls events<sup>10</sup>. Similarly, another study that analysed the elite South American players' work-rate profiles during international football matches reported changes in activities approximately every four seconds<sup>10</sup>.



**Figure 8.** Example of the dominant regions for all players of the two teams determined at same instant time by our movement model with three-seconds future time window (A) and Voronoi regions (B), initial positions are represented by the numbers and displacement directions by the vectors.

Even though the lowest mean value of accuracy achieved was 72.31% for T3, which is a promising result. It was not possible to draw a parallel with related studies found in the literature because the authors did not report the accuracy of each method. Furthermore, there is no consensus regarding the time windows to create the movement models, varying from two seconds<sup>13,14</sup>, one second<sup>17</sup>, and the shortest time to achieve a specific point<sup>4,21</sup>.

When we analysed the players' dominant regions areas, the main finding was that the experiment showed a higher median area value for Voronoi regions compared to dominant regions determined by our movement model. Only the study performed by Ueda, et al.<sup>19</sup> presented dominant regions' area values, however, the authors analysed the teams' dominant regions instead of the players. On the other hand, the statistical significance and the effect size presented in our experiment suggest that the same behaviour may be found in further experiments. The lowest areas of dominant regions determined by our movement model are probably because this model considers regions labelled as free space, which does not occur in the Voronoi regions (Fig. 8B). Our study included this concept to avoid that the regions without clear dominance were associated as players' dominant regions. For instance, during a corner kick situation, the Voronoi regions consider that defenders of the offensive team have dominance of their defensive pitch once they are the closest players, but a fast attack after the corner kick may show that this controlled area is not real because players with greater velocity and acceleration may reach it after few seconds. That is the novelty of our model, showing that the defenders are not really "controlling" these regions that are associated with them following the Voronoi concept. It is important to highlight that the median area value of regions without dominance corresponds to approximately 77% of the pitch's area, with a minimum close to 66% and maximum of 91%. This maximum value probably occurred during specific events of the matches, e.g., during a corner kick, almost all players share a small region of the pitch, with great proximity between opponent players.<sup>22</sup>

Regions without dominance can be considered free spaces that are distant from the game concentration and physically impossible to be reached for a player in a short period, i.e., regions that are closer to the ball locations generally contain a greater number of players. This behaviour occurs because the ball works as an attractor during a football match<sup>20</sup>. In a similar way, Narizuka, et al.<sup>19</sup> evaluated the pitch regions, weighting each one in relation to the degree of sparsity and reported that the densest regions are almost located within the teams' formation, considered as the standard deviation of players' positions centroid. On the other hand, the regions without dominance may represent key spaces that can be explored by the players to increase the chances of success in offensive attempts or prevent the opponent offensive attempts. A previous study reported that the space dominance on the attacking third of the pitch, computed using Voronoi diagram, was related with the number of goals scored and the probability of the winning the match<sup>23</sup>. Using Voronoi diagram, Ueda, et al.<sup>19</sup> found that teams presented narrower dominant regions area values in successful offensive performance when the ball possession was acquired near the central region of the pitch. These studies demonstrated the relevance of the team's dominant regions and their relationship with the performance during football matches<sup>16,24</sup>. Therefore, teams' spatial dominance

assessed by the dominant region analyses can be useful to professionals of sports, making it possible to determine the dominance in important regions of the pitch or during specific situations of the matches. Furthermore, the dominant region by our proposed model can evaluate the teams' spatial dominance enabling the coaches to know the contribution of each player, directly related to their physical performance during the matches.

The findings of our study should be interpreted considering the future time window used because it influences the results, e.g., a larger time-lag to create the movement models can result in larger players' dominant regions and smaller free-space regions. This limitation was previously pointed by Rico-Gonzalez, et al.<sup>7</sup> that suggest caution when analysing dominant region values based on future time windows because the regions that the players reach do not depend exclusively on the physical fitness, but on the time interval used and other factors, such as players' decisions making that occur during this period. Another relevant point is that studies with different future time windows definitions make the comparison difficult, as mentioned above in this discussion. Thus, can be interesting to standardize the future time window for advances in research with practical application on this topic.

In conclusion, in the present study, we presented a new approach to football players' dominant regions analysis, based on a movement model created from their real positions, displacement, velocity, and acceleration vectors. The data accuracy demonstrated acceptable values even at larger time-lag windows than the ones reported in the literature. The players' dominant regions area values computed by our movement model were lower than Voronoi regions. In addition, we showed that the regions without dominance represented a considerable part of the pitch. These findings indicate that the proposed movement model is more realistic representing match dynamics and can be a useful method to evaluate the players dominance during football matches. Coaches can take advantage of the method to analyse opponent teams and to assist their own teams during interventions and planning tactical training.

#### Data availability

The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Received: 5 March 2021; Accepted: 25 August 2021

Published online: 14 September 2021

#### References

1. Paeleas, F. Motor praxeology: a new scientific paradigm. In *Playing Fields: Power, Practice, and Passion in Sport* (Vaccari, M., Ed.) 127–144 (2015).
2. Gibson, J. J. *The Ecological Approach to Visual Perception* Classic. (Psychology Press, 2014).
3. Araújo, D. & Davids, K. Team Synergies in Sport: Theory and Measures. *Front. Psychol.* <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01449> (2016).
4. Newell, K. Constraints on the development of coordination. In *Motor Development in Children: Aspects of Coordination and Control* (1986).
5. Araújo, D., Silva, P. & Ramos, J. P. Affordance-based decisions guide team synergies during match performance. *PSSM* **3**, 11 (2014).
6. Ramshaw, I., Davids, K. W., Shuttleworth, R. & Chose, J. Y. Insights from ecological psychology and dynamical systems theory can underpin a philosophy of coaching. *Int. J. Sport Psychol.* **40**, 540–602 (2009).
7. Rico-Gonzalez, M., Ortega, J. P., Nakamura, F. Y., Moura, F. A. & Arcoo, A. L. Identification, computational examination, critical assessment and future considerations of spatial tactical variables to assess the use of space in team sports by positional data: A systematic review. *J. Phys. Qual.* **77**, 205–221. <https://doi.org/10.2478/qual-2021-0021> (2021).
8. Taki, T. & Hasegawa, J. In *Proceedings Computer Graphics International 2000*, 227–235.
9. Okabe, A., Boots, B. N. & Sugihara, K. O. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams* (Wiley, 1992).
10. Kim, S. Voronoi analysis of a soccer game. *Nonlinear Anal. Model.* **9**, 233–240 (2004).
11. Fillet, C., Ruscillo, B., D'Ottavio, S. & Fanelli, V. A study of relationships among technical, tactical, physical parameters and final outcomes in elite soccer matches as analyzed by a semi-automatic video tracking system. *Percept. Mot. Skills* **124**, 601–620. <https://doi.org/10.1177/0031512517692994> (2017).
12. Bhattacharya, B. B. Maximizing Voronoi regions of a set of points enclosed in a circle with applications to facility location. *J. Math. Model. Algorithms* **9**, 375–392. <https://doi.org/10.1007/s10852-010-9142-0> (2010).
13. Low, B. et al. A systematic review of collective tactical behaviours in football using positional data. *Sports Med.* **50**, 343–385 (2020).
14. Nakatani, R., Maeno, J., Marakami, K. & Naruse, T. In *RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII. Lecture Notes in Computer Science* (eds J. Balas, M. G. Lagoudakis, T. Naruse, & S. S. Ghidary) 228–239 (Springer, Berlin, Heidelberg, 2010).
15. Fujimura, A. & Sugihara, K. Geometric analysis and quantitative evaluation of sport teamwork. *Syst. Comp. Jpn.* **36**, 49–58. <https://doi.org/10.1002/sc.20254> (2005).
16. Ueda, F., Masuaki, H. & Hirotsuki, H. The causal relationship between dominant region and offense-defense performance-focusing on the time of ball acquisition. *Football Sci.* **11**, 1–17 (2014).
17. Breifeld, U., Lasik, J. & Mair, S. Probabilistic movement models and zones of control. *Mach. Learn.* **108**, 127–147. <https://doi.org/10.1007/s10994-018-5725-1> (2019).
18. Barros, R. M. L. et al. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *J. Sports Sci. Med.* **6**, 233–242 (2007).
19. Figueiroa, P. J., Leite, N. J. & Barros, R. M. L. Background recovering in outdoor image sequences: An example of soccer players segmentation. *Image Vis. Comput.* **24**, 363–374 (2006).
20. Figueiroa, P. J., Leite, N. J. & Barros, R. M. L. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. *Comput. Vis. Image Underst.* **101**, 122–135 (2006).
21. Lara, J. P. R., Vieira, C. L. R., Minato, M. S., Moura, F. A. & Barros, R. M. L. Validation of a video-based system for automatic tracking of tennis players. *Int. J. Perform. Anal. Sport* **18**, 137–150. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1456886> (2018).
22. Taylor, J. *Introduction to Error Analysis, the Study of Uncertainties in Physical Measurements* 2nd edn. (University Science Books, 1997).
23. Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **81**, 103–107. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.2.103> (2015).
24. Moura, F. A. et al. A spectral analysis of team dynamics and tactics in Brazilian football. *J. Sports Sci.* **31**, 1568–1577. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.789920> (2013).

25. Savalbergh, G. J. P., Whitting, H. T. A. & Pipers, J. R. *Advances in Psychology* (ed. Summers, J.), Vol. 94, 313–342 (North-Holland, 1992).
26. Goets, A., Decross, T. & Davis, J. in *Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics. ECML/PKDD 2018. Lecture Notes in Computer Science* (eds U. Brefeld et al.) 115–126 (Springer, Cham, Dublin, 2019).
27. Kim, S. Player's positional dependence of fractal behaviors in a soccer game. *Fractals-Complex Geom. Patterns Scaling Nat. Soc.* **14**, 71–76 (2006).
28. Rosenthal, R. *The Handbook of Research Synthesis* (eds. Cooper, H.M. & Hedges, L.V.) Chap. 18, 231–244 (Russell Sage Foundation, 1994).
29. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* 2nd edn. (Erlbaum Associates, 1988).
30. McGarry, T., Anderson, D. I., Wallace, S. A., Hughes, M. D. & Franks, I. M. Sport competition as a dynamical self-organizing system. *J. Sports Sci.* **20**, 771–781. <https://doi.org/10.1080/026404102320675620> (2002).
31. Rienzi, E., Druot, B., Reilly, T., Carter, J. E. & Martin, A. Investigation of anthropometric and work-rate profiles of elite South American international soccer players. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **40**, 162–169 (2000).
32. Caetano, T. G., de Souza, N. M., Bueno, M. I. D. O., Cunha, S. A. & Moura, E. A. Interpersonal interaction during official soccer matches considering the coupling of different playing positions. *Int. J. Perform. Anal. Sport* **20**, 646–658. <https://doi.org/10.1080/24748668.2020.1775412> (2020).
33. Narinaka, T., Yamazaki, Y. & Takizawa, K. Space evaluation in football games via field weighting based on tracking data. *Sci. Rep.* **11**, 5589. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04939-7> (2021).
34. Rein, R., Raabe, D. & Memmert, D. "Which pass is better?" Novel approaches to assess passing effectiveness in elite soccer. *Hum. Mov. Sci.* **35**, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.07.010> (2017).

### Acknowledgements

This work was supported by the (Fundação Araucária #1) under grant (185/2013), (CNPq #2) under grants (446548/2014-6 and 307560/2016-3), and (FAPESP #3) under grants (2016/50250-1, 2017/20945-0 and 2018/19007-9). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001.

### Author contributions

F.A.M., F.G.C., L.E.B.M., P.R.C.R., and S.A.C. conceived the idea and conceptualized the work. F.A.M., F.G.C., and S.A.C. collected the data and supervised the research. F.A.M., F.G.C., R.S.T., and S.B.J. designed the analysis procedures and interpreted the data. F.A.M. and F.G.C. wrote the main manuscript text. F.A.M., F.G.C., L.E.B.M., P.R.C.R., R.S.T., S.A.C., and S.B.J. revised the original manuscript text.

### Competing interests

The authors declare no competing interests.

### Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to F.G.C.

Reprints and permissions information is available at [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints).

**Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

 **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2021