

## Explorando a Correlação Espacial na Coleta de Dados em Redes de Sensores sem Fio

Leandro A. Villas<sup>1,3</sup>, Daniel L. Guidoni<sup>1</sup>, Regina B. Araujo<sup>2</sup>,  
Azzedine Boukerche<sup>3</sup> e Antonio A. F. Loureiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UWL - Laboratório de Pesquisa – Universidade Federal de Minas Gerais

<sup>2</sup>WINDIS - Laboratório de Pesquisa – Universidade Federal de São Carlos

<sup>3</sup>PARADISE Research Laboratory – SITE, University of Ottawa

{leandro,guidoni,loureiro}@dcc.ufmg.br, regina@dc.ufscar.br

{boukerch,leandro}@site.uottawa.ca

**Abstract.** *Dense sensor networks are typically deployed for fine-grain monitoring in a wide range of applications. Due to the high density nodes, it is very likely that spatially correlated information or redundant data are detected by nearby nodes when these are sensing an event. Exploiting the spatial correlation can save energy, a key issue for Wireless Sensor Networks. In this work, we propose an Energy-Aware Spatial Correlation mechanism (ESC) based on correlation regions. The sensed information of a region is forwarded to the sink by only one node inside that region. Also, the area of the correlation regions can be changed dynamically by the sink node to achieve the required accuracy of the sensed information. Simulation results show that using ESC, the information about the event can be sensed with 97% of accuracy and save 75% residual energy of nodes within the area of the observed phenomena.*

**Resumo.** *Redes de sensores densas são normalmente implantadas para o monitoramento de granularidade fina em uma ampla variedade de aplicações. Devido à alta densidade de nós, é muito provável que as informações espacialmente correlacionadas ou redundantes são detectadas por nós próximos, quando estes estão sentindo um evento. Explorando a correlação espacial pode poupar energia, uma questão fundamental para redes de sensores sem fio. Neste trabalho, propomos um mecanismo de correlação espacial ciente da energia (ESC) com base nas regiões de correlação. A informação senseada de uma região é encaminhada para o sink por um único nó dentro dessa região. Além disso, a área das regiões de correlação pode ser alterada dinamicamente pelo nó sink para conseguir a precisão necessária das informações senseadas. Os resultados das simulações mostram que usando ESC, as informações sobre o evento podem ser sentidas com 97% de precisão e economizar 75% da energia residual de nós dentro da área de fenômenos observados.*

### 1. Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [Akyildiz et al. 2002] são compostas por uma grande quantidade de nós sensores que monitoram fenômenos físicos ou ambientais cooperativamente. Esse tipo de rede tornou-se popular devido à sua aplicabilidade em diferentes áreas, como ambiental, vigilância, industrial, meteorológica, saúde, militar, monitoramento espacial entre diversas outras [Younis et al. 2006, Villas et al. 2010]. Além

disso, diversas propriedades físicas podem ser monitoradas, como temperatura, umidade, pressão, luz, som e vibração. Os nós sensores são responsáveis por coletar dados e transmiti-los para o nó *Sink*.

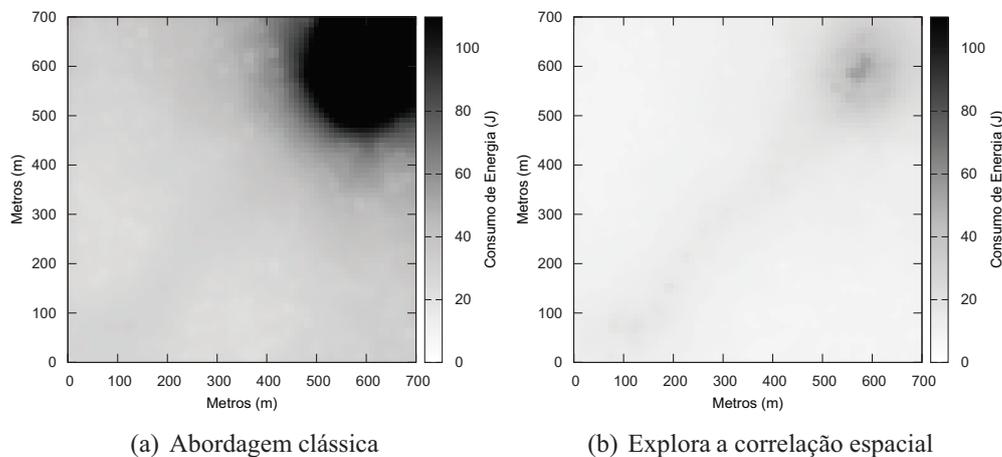
Os nós sensores são dispositivos com restrições de energia. O consumo de energia é geralmente associado à quantidade de dados transmitidos na rede, pois a comunicação é a atividade que demanda uma maior quantidade de energia. Uma solução simples para esse problema seria a reposição da bateria dos nós sensores. Entretanto, essa técnica é inviável devido à grande quantidade de nós na rede ou porque os nós sensores podem ser inacessíveis em algumas aplicações, como monitoramento de vulcões ou do espaço. Dessa forma, algoritmos e protocolos projetados para RSSF devem considerar o consumo de energia em sua concepção.

A densidade de nós sensores depositados na área de interesse pode variar de acordo com os requisitos da aplicação. Em alguns casos, a densidade de nós sensores pode ser de 20 nós/m<sup>3</sup> ou mais [Shih et al. 2001]. Como resultado da alta densidade de nós, durante o processo de sensoriamento, é provável que os nós coletem dados redundantes ou espacialmente correlacionados. Nesse caso, nós espacialmente próximos tendem a sensoriar informações semelhantes. Embora o envio de dado semelhante aumente a precisão do evento detectado, ele aumenta o consumo de energia no roteamento, pois mais informações serão enviadas para o nó *Sink*. Como a redução do consumo de energia é uma questão-chave para aumentar o tempo de vida da rede, correlação espacial pode ser explorada para gerenciar o conjunto de nós que coletam dados redundantes/semelhantes e selecionar um subconjunto desses nós para notificar o dado sensorado sem perder sua precisão.

A Figura 1 ilustra o consumo de energia no processo de coleta de dados utilizando duas abordagens. A primeira abordagem (Figura 1(a)) ilustra uma abordagem clássica de coleta de dados, onde todos os nós que detectaram o evento enviam a informação sensorada para o nó *Sink*. A segunda abordagem (Figura 1(b)) explora a correlação espacial. Assim, apenas um subconjunto de nós que detectaram o evento enviam a informação sensorada para o nó *Sink*. A rede utilizada em ambas as figuras possui 1024 nós aleatoriamente distribuídos em um campo de sensoriamento de 700x700 metros. O nó *Sink* está localizado nas coordenadas (0,0). O evento ocorrido na rede possui centro nas coordenadas (600,600) com um raio de 70 metros. Para modelar o consumo de energia no roteamento dos dados, foi utilizado os parâmetros de consumo de energia do nó sensor Mica2 (0.0801 Joules para uma transmissão e 0.022 Joules para uma recepção).

Tipicamente, a ocorrência de um evento na região monitorada faz com que os nós que detectaram o evento se clusterizem e um nó é eleito como coordenador do cluster [Yuan and Chen 2009, Yoon and Shahabi 2005, Villas et al. 2010, Nakamura et al. 2009, Chandrakasan et al. 2002]. Esse nó é responsável por receber todas as notificações do evento e encaminhá-las para o nó *Sink*. O consumo de energia dos nós que detectaram o evento é maior comparado com os demais nós da rede (Figura 1(a)). Isso acontece porque os nós dentro do cluster consomem mais energia transmitindo a informação sensorada e ouvindo a comunicações de seus vizinhos. Naturalmente, a correlação espacial das informações sensoradas existe quando os nós que detectaram o evento estão próximos geograficamente, possuindo assim informações semelhantes. Nesse caso, ao invés de ter todos os nós do cluster reportando dados para o *Sink* simultaneamente,

utilizando correlação espacial os nós que possuem informações espacialmente correlacionadas se alternam na notificação do Sink sobre o evento (Figura 1(b)).



**Figura 1. Consumo de Energia na Coleta de Dados**

Correlação espacial foi explorada na literatura por alguns autores [Yuan and Chen 2009, Yoon and Shahabi 2005, Akyildiz et al. 2004b, Le et al. 2008, Liu et al. 2007b]. Entretanto, nenhum desses trabalhos é focado na seleção apropriada de nós representativos<sup>1</sup>, em termos de energia residual. Essa é uma estratégia interessante, onde nenhum nó é penalizado tendo que enviar todas as suas notificações sobre o evento detectado, e conseqüentemente, consumindo mais energia do que os demais nós que também detectaram o evento. Além disso, EEDC [Liu et al. 2007a] considera a energia residual dos nós mas o algoritmo proposto é baseado em um pressuposto que os nós conseguem se comunicar com o *Sink* em apenas um salto, o que é impraticável em redes de sensores sem fio.

Neste trabalho, é apresentado um mecanismo de correlação espacial ciente da energia (Energy-Aware Spatial Correlation - ESC) baseado em região de correlação<sup>2</sup>. As contribuições da abordagem proposta são (i) balancear e reduzir o consumo de energia dos nós que detectaram o evento eliminando notificações redundantes e (ii) ajustar dinamicamente a quantidade de nós representativos que notificarão o evento de acordo com os requisitos da aplicação e das características do evento.

Na abordagem ESC, os nós que detectaram o mesmo evento são clusterizados em regiões correlacionadas e um mecanismo de correlação espacial é aplicado para selecionar os nós que são representativos da região do fenômeno observado. De acordo com os requisitos da aplicação, o nó *Sink* define a região de correlação, na qual a notificação de apenas um nó dentro dessa região é o suficiente para representar a região. Além disso, o tamanho da região de correlação pode ser modificada dinamicamente para obter a precisão desejada das informações sensoreadas. Dessa forma, toda a região do evento é eficientemente sensoreada por um conjunto de nós representativos que executam a tarefa de coleta de

<sup>1</sup>Um nó é considerado representativo quando ele reporta a informação de um evento em uma determinada área representando todos os nós que detectaram o evento e que possuem informações semelhantes

<sup>2</sup>Região de correlação é a região onde os nós possuem leituras similares

dados. Resultados de simulação mostram que utilizando o ESC, as informações sobre o evento sensoreados podem ter 97% de precisão economizando 75% da energia residual dos nós dentro da área do fenômeno observado em comparação com abordagem clássica para coleta de dados (estratégia de coleta de dados precisos).

O restante desse trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 provê uma visão geral das abordagens existentes que exploram a correlação espacial. O mecanismo de correlação espacial ciente da energia é apresentado na Seção 3. Os resultados de simulação são apresentados na Seção 4. A aplicabilidade do ESC é discutida na Seção 5. Finalmente, a Seção 6 descreve as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Nessa seção, é discutido algumas abordagens da literatura que exploram a correlação espacial em RSSFs. Em [Akyildiz et al. 2004a], foi formulada a relação entre a localização espacial dos nós sensores na área do evento e a confiabilidade da detecção de eventos. É estimado o número mínimo de nós representativos que é necessário no campo monitorado. Cada nó representativo representa um grupo de nós espacialmente correlacionados. No entanto, nesta abordagem, a energia não foi considerada como critério na seleção de um nó representativo. A abordagem proposta atinge o ganho global de energia na rede, independentemente da energia do nó individual. Mas não é uma abordagem de balanceamento de carga. Além disso, se houver necessidade de trocar o nó representante de uma região de correlação, a distorção tolerável é afetada. Mudanças frequentes nos nós representativos produzem mais distorções e, portanto, é necessário reconfigurar toda a rede para atingir o limite de distorção desejado pela aplicação. Por outro lado, nós representativos trabalhando em suas regiões de correlação por um período mais longo resulta na distribuição da carga injusta, reduzindo o tempo de vida da rede.

No CAG [Yoon and Shahabi 2005] foi proposto um mecanismo para formar clusters de nós que detectam valores similares, apenas um nó de cada cluster notifica as leituras. Como resultado, apenas um valor por cluster é notificado para o *Sink* e as leituras de outros sensores são ignoradas. O algoritmo CAG é realizado em duas fases: consulta e resposta. Na fase consulta, clusters centrado nos dados são construídos de acordo com um limite de erro especificado pelo usuário  $\tau$ . Cada nó sensor compara o seu próprio valor de interesse com o valor na mensagem de consulta. Se o valor está dentro de  $\tau$ , o nó se junta ao cluster do nó pai, onde o nó pai é o nó que encaminhou a mensagem de consulta a ele. Senão, o nó acrescenta o seu valor na mensagem de consulta. Na fase de resposta, CAG transmite um valor único por cluster, em outras palavras, somente os clusterheads contribuem para a agregação. A fase de inundação no CAG apresenta alto custo de controle e de manutenção. Além disso, a manutenção dos clusters centrado nos dados continua sendo um problema difícil.

Outra abordagem é Energy-Efficient Data Collection framework (EEDC) [Liu et al. 2007a] para coleta contínua de dados em redes de sensores. Ele assume que todos os nós sensores comunicam diretamente com o *Sink*. Ele é projetado para ser executado de forma centralizada no *Sink* para o agrupamento dos nós sensores em clusters e dinamicamente gerenciar os clusters em resposta às mudanças ambientais. A principal limitação dessa abordagem é o pressuposto da arquitetura de rede *single-hop*, esta hipótese é pouco viável e difícil de justificar em redes de sensores sem

fiu de larga escala. Outra desvantagem é que o algoritmo de agrupamento é centralizado e executado no *Sink* o que significa que os dados de todos os sensores têm de ser enviados de volta para o *Sink*, que em seguida, armazena e processa uma quantidade significativa de dados para realizar a partição da rede.

### 3. Proposta

Nessa seção, é definido o modelo de correlação espacial e apresentado o mecanismo de correlação espacial proposto (ESC). O objetivo do ESC é que o tamanho da região de correlação possa ser redimensionado dinamicamente de acordo com os requisitos da aplicação e das características do evento. Além disso, gerenciar o consumo de energia dos nós que detectam evento eliminando notificações redundantes.

#### 3.1. Modelo de Correlação Espacial

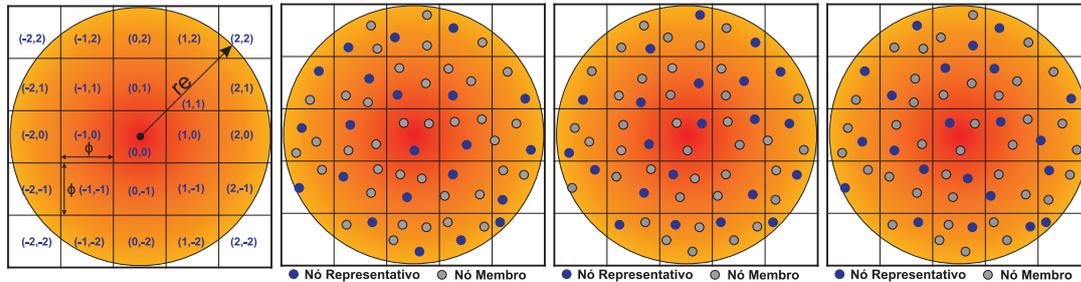
Como descrito anteriormente, nós espacialmente próximos tendem a sensorar valores semelhantes. No entanto, essa proximidade ( $\phi$ ) depende dos requisitos da aplicação e características do evento. Algumas aplicações são mais críticas e são menos tolerantes a discrepâncias nos valores sensorados sobre o fenômeno observado, exigindo que nós próximos reportam os dados sensorados (região de correlação é menor). Enquanto outras aplicações podem ser mais tolerantes a discrepâncias nos valores sensorados, não exigindo que nós próximos reportam os dados sensorados (região de correlação é maior). Nós definimos uma região como região de correlação, onde os valores sensorados pelos nós sensores são considerados semelhantes para a aplicação e, portanto, uma única leitura é o suficiente para representar a região. O tamanho da região de correlação varia de aplicação para aplicação e de evento para evento. Assim, o tamanho da região de correlação está diretamente relacionado com a aplicação. Da mesma forma para certos eventos, se a característica do evento variar significativamente a curta distância, esse evento necessita ser relatado por nós relativamente próximos ao contrário dos eventos cuja as características não mudam a curta distância.

#### 3.2. Mecanismo de Correlação Espacial Ciente da Energia - ESC

O ESC é adaptativo para atingir a precisão na informação sensorada sobre o fenômeno observado. Para alcançar esse objetivo, o ESC pode alterar dinamicamente o tamanho da região de correlação. Um evento é dividido em células e cada célula define uma região de correlação e os nós dentro de cada célula são assumidos ser espacialmente correlacionados. Assim, somente um nó dentro de célula reporta as informações sensorada e este nó é considerado o nó representativo da célula. As células são consideradas independentes, assim a troca de nós representativos em uma célula não exige nenhuma reconfiguração. O revezamento de nós representativos em cada célula é feito para equilibrar o consumo de energia de nós correlacionados espacialmente. Além disso, as regiões de correlação são independentes uma das outras e, portanto, o redimensionamento das regiões de correlação não exige a reconfiguração da rede. Assim, o mecanismo proposto é altamente adaptativo para os eventos de diferentes intensidades.

A Figura 2(a) ilustra o mecanismo de correlação espacial proposto, a região do evento é decomposta em  $2re/\phi \times 2re/\phi$  células, onde  $re$  é o raio do evento e  $\phi$  é o tamanho da célula (região de correlação). Foi considerado que o tamanho máximo de uma célula é  $\phi = rc \times \cos 45^\circ$ , onde  $rc$  é o raio de comunicação dos nós sensores. Essa consideração foi

feita para garantir que todos os nós na mesma célula se comunicam entre si. O tamanho da célula pode ser variado para controlar a precisão na informação sensoreada  $\times$  consumo de energia. Neste caso, a região de correlação pode variar entre  $0 \leq \phi \leq rc \times \cos 45^\circ$ . Quando  $\phi = 0$ , todos os nós reportam o dado sensoreado (solução ótima em termos de precisão na informação). Para  $\phi > 0$ , somente o nó representativo em cada célula reporta o dado sensoreado.



(a) Controle da Região de Correlação (b) Instante de Tempo 1 (c) Instante de Tempo 2 (d) Instante de Tempo 3

### Figura 2. Mecanismo de Correlação Espacial Empregado no Evento

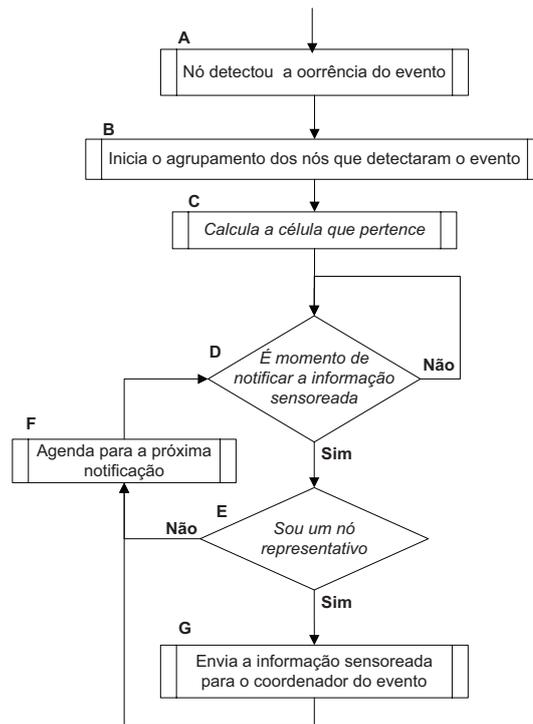
O ESC seleciona um único nó representativo em cada célula de dimensões  $\phi \times \phi$  a cada notificação. As Figuras 2(b), 2(c) e 2(d) mostram os nós representativos (nós azuis) em diferentes instantes de tempo na região do evento aplicando o ESC.

Nó representativo é o nó que fez menos notificações entre os nós que pertencem a mesma célula. Em caso de empate, o nó representativo será o nó com maior nível de energia. Na fase de agrupamento, os nós armazenam informações sobre nós o nível de energia dos seus vizinhos, esta informação é atualizada sempre que uma transmissão de dados é realizada, uma vez que os pacotes de dados transmitidos contêm um campo nível de energia que contêm informações sobre o nível de energia do nó que enviou e os nós vizinhos atualizam as informações sobre o nível de energia do nó que enviou.

**Funcionamento do ESC:** Após a deposição os nós sensores na área de interesse, o interesse da aplicação é anunciado na rede através de um *flooding*. Durante o anúncio de interesse da aplicação é feita a descoberta e armazenamento da posição dos vizinhos e do *Sink*. O *Sink* inicia enviando uma mensagem de *flooding*, com quatro campos: ID, Phenomenon\_of\_Interest, CoordSender e CoordSink, onde ID é o identificador do nó que retransmitiu a mensagem, Phenomenon\_of\_Interest é o valor de interesse para a aplicação (por exemplo, temperatura maior que 60 graus), CoordSender é a posição geográfica  $(x, y)$  do nó que retransmitiu a mensagem e CoordSink é a posição geográfica  $(x, y)$  do *Sink*. Nessa fase, nós sensores armazenam informações como identificação, posição geográfica dos vizinhos e do *Sink* em uma tabela de vizinhos *neighborhood*. Estas informações serão usadas no encaminhamento dos dados coletados para o *Sink*.

Quando os nós detectam um evento no ambiente monitorado (item A da Figura 3), esses nós iniciam o algoritmo de eleição de líder e se candidatam a nó líder (coordenador do grupo), item B da Figura 3. Na eleição do coordenador do grupo, todos os nós são elegíveis. Porém, é eleito apenas o nó que tenha a menor distância para o *Sink*. Quando

há empate, isto é, dois ou mais nós concorrentes têm a mesma distância para o *Sink*, apenas o nó com maior nível de energia continua elegível. Ao final do algoritmo de eleição de líder só existe um nó líder (coordenador) no grupo. Todos os outros nós que detectaram o mesmo evento são nós com papel de nós membro (em cada notificação, um subconjunto de nós membro serão nós representativos). O nó coordenador do grupo reúne as informações recolhidas pelos nós representantes e as envia para o *Sink*.



**Figura 3. Funcionamento do Mecanismo de Correlação Espacial**

Após o agrupamento dos nós que detectaram o mesmo evento, cada nó verifica a qual célula ele pertence na área do evento (item C da Figura 3). Cada célula é representada por um par ordenado  $(x_c, y_c)$ , veja a Figura 2(a). Se o tamanho da célula é zero ( $\phi = 0$ ), então não existe correlação espacial entre os nós e todos os nós do grupo são nós representativos (solução ótima em termos de precisão na informação). Caso contrário, cada nó calcula o valor de  $x_c$  e  $y_c$  da célula em que pertence. Para esse cálculo é necessário a posição do nó  $(x_n, y_n)$ , as coordenadas  $(x_e, y_e)$  do centro do evento e o tamanho da célula  $(\phi)$ . Para calcular o valor  $x_c$  da célula em que o nó pertence, os passos mostrados no Algoritmo 1 são executados.

Para o cálculo do valor  $y_c$  da célula em que o nó pertence, os mesmos passos são executados, mas ao invés de usar  $x_n$  e  $x_e$ , são utilizados os valores de  $y_n$  e  $y_e$ .

Após calcular a célula em que pertence (item C da Figura 3) e Algoritmo 1), se for momento de notificar a leitura realizada, o nó verifica se é um nó representativo (item E da Figura 3). Se o nó for um nó representativo, então o valor sensoreado é enviado para o coordenador do grupo (coordenador do grupo foi selecionado no item B da Figura 3).

---

**Algoritmo 1:** Calcula o valor de  $x_c$  da célula em qual o nó pertence
 

---

```

1 Entrada:  $S$  // Conjunto de nós que detectou o evento
   Coordenadas do nó  $(x_n, y_n)$ , coordenadas do centro do evento  $(x_e, y_e)$  e tamanho
   da célula  $(\phi)$ 
2 Saida:  $x_c$  // valor de  $x_c$  no par ordenado  $(x_c, y_c)$  da célula em qual o nó pertence
3 para cada  $n \in S$  faça
4    $x_c = 0$  //  $x_c$  do nó  $n$  é inicializado como célula central
   // Nó  $n$  verifica se ele pertence a uma célula à direita da célula central
5   se  $\frac{(x_n - x_e)}{(\frac{\phi}{2})} > 1$  então
     // Nó  $n$  calcula o valor  $x_c$  da célula que ele pertence
6      $x_c = \lfloor \frac{(x_n - x_e) - (\frac{\phi}{2})}{c} \rfloor + 1$ 
7   fim se
   // Nó  $n$  verifica se ele pertence a uma célula à esquerda da célula
   central
8   senão se  $\frac{(x_n - x_e)}{(\frac{\phi}{2})} < -1$  então
     // Nó  $n$  calcula o valor  $x_c$  da célula que ele pertence
9      $x_c = \lfloor \frac{(x_n - x_e) + (\frac{\phi}{2})}{c} \rfloor - 1$ 
10  fim se
11 fim para

```

---

Assim, o coordenador do grupo envia a informação coletada para o *Sink* usando o menor caminho (em distância euclidiana). O menor caminho é calculado baseado nas informações obtidas durante o anúncio de interesse, para mais detalhes do cálculo de menor caminho veja [Villas et al. 2010]. Se o nó não for um nó representativo, então o nó agenda para fazer leitura no ambiente na próxima notificação. Se for necessário redimensionar a região de correlação de um evento para satisfazer algum requisito da aplicação, o Sink envia o novo valor de  $\phi$  para os nós do grupo e os nós calculam novamente a célula que pertence (os nós executam o algoritmo 1 novamente).

#### 4. Avaliação de Desempenho

O mecanismo proposto é avaliado com a estratégia de coleta de dados precisos. Na estratégia de coleta de dados precisos, todos nós sensores que detectam o evento informam suas leituras para o *Sink* em cada rodada de coleta de dados. O principal objetivo desta comparação é avaliar o desempenho do ESC em relação à estratégia de coleta de dados precisos, considerando as seguintes métricas: (i) nós representativos, (ii) consumo de energia na coleta de dados e (iii) imprecisão nas leituras.

##### 4.1. Metodologia

A avaliação é realizada através de simulações utilizando o simulador SinalGo v.0.75.3 [Sinalgo 2008]. Cada simulação foi replicada 33 vezes. Em todos os resultados, as curvas representam os valores médios, enquanto que as barras de erros representam o intervalo de confiança de 95%. Os parâmetros de simulação são apresentados na Tabela 1. Os eventos ocorrem em posição aleatória. Nós consideramos a área do campo monitorado como a relação  $\sqrt{n\pi r_c^2/d}$ , onde  $n$  é o número de nós,  $r_c$  é o raio de comunicação, e  $d$  é o grau médio de vizinhos. Nós sensores são depositados de forma aleatória.

Foram utilizadas as seguintes métricas na avaliação dos algoritmos:

- **Nós representativos:** é o número de nós que reportam dados sobre o fenômeno observado.

Tabela 1. Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
Nó <i>Sink</i>	1 (canto superior esquerdo)
Número de nós sensores	1024
Densidade	(20, 25, 30)
Diâmetro do evento ( <i>metros</i> )	(50, 100, 150, 200)
Região de correlação ( $\phi$ )	(0, 10, 20, 30, 40, 50)
Duração do evento ( <i>minutos</i> )	(1 até 10)
Taxa de notificação ( <i>porsegundos</i> )	1
Alcance do rádio de comunicação ( <i>metros</i> )	80
Número de eventos	1
Duração da simulação ( <i>hora</i> )	1

- **Consumo de energia na coleta de dados:** é a quantidade de energia consumida pelos nós sensores que detectaram o evento. Essa métrica indica o quanto é possível economizar energia dos nós sensores quando a correlação espacial é explorada.
- **Imprecisão na leitura ( $\lambda$ ):** é a imprecisão na informação sobre o fenômeno observado. É a relação da leitura aproximada ( $\alpha$ ) e leitura exata ( $\beta$ ), veja a Equação 1.

$$\lambda = \frac{|\alpha - \beta|}{\beta} \times 100 \quad (1)$$

#### 4.2. Modelo de Evento

O fenômeno observado na área monitorada foi a temperatura. A temperatura nas coordenadas  $(x, y)$  na área do evento é dada pela Equação 2, onde  $T_E$  é a temperatura no centro do evento,  $D_E$  é a distância euclidiana (em metros) para o centro do evento e  $T_D$  é a diminuição da temperatura (metros por Graus). Quanto mais distante o nó esta do centro do evento, menor será a temperatura detectada.

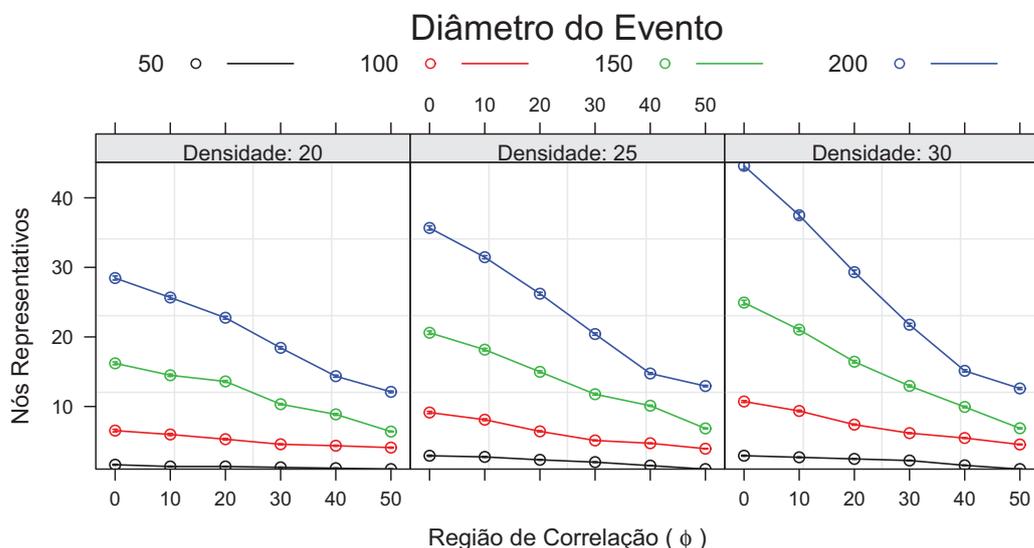
$$temperatura = T_E - (D_E \times T_D); \quad (2)$$

##### 4.2.1. Nós Representativos

O número de nós representativos que notifica o evento depende de três parâmetros (diâmetro do evento, tamanho da região de correlação e a densidade). Nesse cenário de simulação, o diâmetro da rede, densidade e tamanho da região de correlação (apresentados na Tabela 1) foram variados para avaliar o número de nós representativos quando a rede tem densidade (20, 25 e 30) grau médio de vizinhos, diâmetro do evento (50, 100, 150 e 200) metros e região de correlação ( $\phi$ ) com (0, 10, 20, 30, 40, e 50) metros.

A Figura 4 apresenta o número de nós representativos quando a região de correlação, densidade e diâmetro do evento são variados. Como esperado, se o tamanho da região de correlação permanece fixo o número de nós representativos aumenta quando a densidade e/ou diâmetro do evento aumentam. Já que, a densidade é dependente de pré-projeto e o diâmetro do evento não é conhecido a priori. Entretanto, em nossa solução, o

número de nós representativos é controlado pelo tamanho da região correlação explorando a correlação espacial.



**Figura 4. Número de Nós Representativos**

Facilmente podemos observar que para valores maiores de  $\phi$  o número de nós representativos é menor e conseqüentemente a quantidade de dados reportados será menor. Em particular, para o diâmetro evento de 200 metros, regiões de correlação 50 metros e densidade de 30, o número de nós representativos é reduzido em 4 vezes em comparação com a estratégia de coleta de dados precisos ( $\phi = 0$ ). Conseqüentemente, a quantidade de energia consumida por nós dentro da área do fenômeno observado também é reduzida em 4 vezes, veja a Figura 5.

Note que, para regiões de correlação maiores o número de nós representativos é menor, portanto, o consumo de energia é menor (veja a Figura 5). Mas por outro lado, a imprecisão na leitura será maior (veja a Figura 6). Em nossa solução, a aplicação pode definir o tamanho da região de correlação, definindo o valor de  $\phi$  de acordo com a precisão necessária.

#### 4.2.2. Energia Consumida

A Figura 5 mostra o consumo de energia dos nós dentro da área do fenômeno observado. Para esta análise, o consumo de energia foi verificado para cenários com densidade (20, 25 e 30) grau médio de nós, diâmetro do evento (50, 100, 150 e 200) metros, eventos que duram de 1 à 10 minutos e região correlação ( $\phi$ ) de (0, 10, 20, 30, 40 e 50) metros. Para ( $\phi = 0$ ), a estratégia de coleta de dados precisos é executada. No ESC, os nós representativos são alternados para conseguir um consumo de energia homogênea dos nós que estão reportando dados e diminuir a imprecisão das leituras.

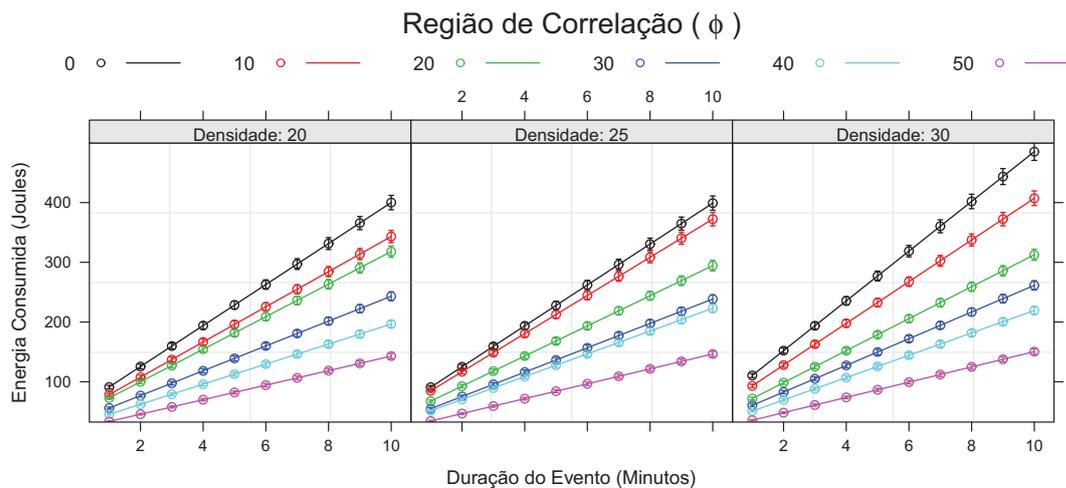


Figura 5. Consumo de energia dos nós que estão reportando dados

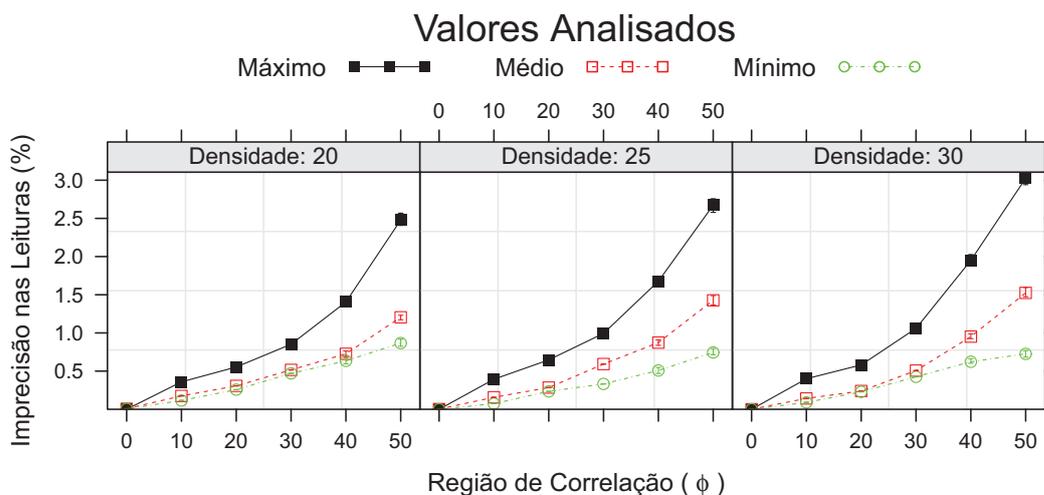
Quando o tamanho da região de correlação aumenta, o número de nós representativos diminui (ver Figura 4), conseqüentemente, o consumo de energia é menor, pois menos nós sensores vão reportar dados. Nos cenários analisados, é possível economizar 75% da energia residual dos nós dentro da área do fenômeno observado em comparação com a abordagem clássica para a coleta de dados (estratégia de coleta de dados precisos) com precisão na informação maior que 97%, veja a Figura 6.

#### 4.2.3. Imprecisão na Leitura

Quando a correlação espacial é explorada, o nível de precisão da informação sobre o fenômeno observado tende a reduzir. Neste cenário de simulação, o diâmetro do evento, densidade e o tamanho da região de correlação foram variados para avaliar a imprecisão nas leituras, quando a rede possui densidade (20, 25 e 30) grau médio de vizinhos, diâmetro do evento (50, 100, 150 e 200) metros e regiões de correlação ( $\phi$ ) com (0, 10, 20, 30, 40 e 50) metros. Quando ( $\phi=0$ ) a abordagem clássica para a coleta de dados é realizada (estratégia de coleta de dados precisos), significa que a correlação espacial não é explorada, ou seja, todos os nós que detectaram o evento vão reportar as suas leituras. Conseqüentemente, a imprecisão é de 0%. Sem perda de generalidade, o fenômeno observado foi a temperatura (ver Seção 4.2), mas o ESC funciona para qualquer outro tipo de fenômeno com diferentes características. Analisamos a imprecisão na leitura de valores mínimo, médio e máximo.

Quando a densidade de nós aumenta a imprecisão na leitura aumenta também. Isso ocorre, pois o número de nós dentro de cada célula aumenta. Em outras palavras, quando a densidade aumenta o número de nós que detectam o evento também aumenta. Entretanto, o número de nós representativos permanece o mesmo.

Note que a maior imprecisão na informação é na leitura do valor máximo quando (densidade ou região de correlação) aumenta. Isso ocorre, pois os nós que detectam o



**Figura 6. Imprecisão da informação no fenômeno observado**

valor máximo estão na célula central (veja a Figura 2) e com um maior número de nós dentro da célula central, maior será o número de nós que reportam dados com valores próximos ao valor máximo (o valor máximo é reportado somente quando o nó que detecta a maior temperatura é o nó representativo da célula central) - em cada notificação é escolhido um diferente nó representativo para cada célula. Nos cenários avaliados, a maior imprecisão observada foi de 3%, mas o consumo de energia foi reduzido em 75% (veja a Figura 5) em comparação com a abordagem clássica de coleta de dados (estratégia de coleta de dados precisos).

Leituras do valor mínimo têm a menor imprecisão, isso ocorre porque há mais células com nós que detectam o valor mínimo (células na fronteira do evento, veja a Figura 2). Além de ter mais células, estas células na fronteira do evento tendem a ter menos nós dentro delas. A maior imprecisão na leitura observada foi menor do que 1% e o consumo de energia foi reduzido em 75% (veja a Figura 5) em comparação com a abordagem clássica para a coleta de dados (estratégia de coleta de dados precisos).

É importante notar que há um *trade-off* entre a imprecisão nas leituras e consumo de energia. Por exemplo, se a aplicação exige que para o valor máximo a imprecisão seja menor que 0,5%, então, o valor de  $\phi$  é definido como 10 ( $\phi = 10$ ) e a imprecisão nas leituras do valor máximo será inferior a 0,5% e a redução no consumo de energia seria em torno de 33% (veja a Figura 5 com  $\phi = 10$ ).

## 5. Aplicabilidade da solução proposta

Nesse trabalho, nós consideramos que cada nó sensor conhece sua posição geográfica. Esta é uma suposição razoável em RSSFs, uma vez que existem várias soluções de localização [Oliveira et al. 2009] para calcular a posição dos nós com um baixo custo. A fase de anúncio de interesse da aplicação pode ser adaptada para executar esses algoritmos e calcular a posição dos nós sem nenhum custo de comunicação extra.

O ESC pode ser usado em cenários para diferentes eventos e com diferentes características, já que a região de correlação pode ser controlada dinamicamente pela aplicação.

A vantagem do ESC é a alta precisão dos resultados aproximados. O redimensionamento da região de correlação e a alternância dos nós representativos garantem um limite de imprecisão na coleta de dados sensíveis a duplicação (tais como média) e garante à exatidão na coleta de dados insensível a duplicação (como máximo e mínimo) em determinados instante de tempo. Assim, a imprecisão pode ser limitada pela aplicação, enquanto que reduz um número significativo de transmissão de mensagem (conservação de energia). Este benefício amplifica quando a densidade, o diâmetro do evento, e o nível de correlação dos dados (espaciais) aumentam.

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

A correlação espacial tem sido explorada na literatura para conservar energia. A maioria das abordagens propostas na literatura não considera o nível de energia dos nós na seleção dos nós representativos e as que consideram o nível de energia dos nós tem um alto custo de controle, no entanto, não explora a correlação espacial eficientemente. Neste trabalho, propomos um mecanismo de correlação espacial ciente de energia. Os nós que detectam o mesmo evento são agrupados em regiões correlacionadas e é selecionado um nó representante em cada região de correlação para observar o fenômeno. No entanto, a região de correlação pode ser alterada dinamicamente, a fim de atingir a precisão da informação exigida. Assim, toda a região do evento é sensoreada por um conjunto de nós representativos para realizar a tarefa de coleta de dados. Os resultados obtidos mostram que usando o ESC para coletar dados, as informações sobre o evento podem ser detectadas com alta precisão e poupando energia residual dos nós, em comparação com a abordagem clássica (estratégia de coleta de dados precisos).

Como trabalhos futuros pretendem-se examinar a correlação temporal para melhorar a precisão das informações coletadas sobre o fenômeno observado e reduzir o consumo de energia. Para atingir estes objetivos, nós representativos podem estimar os valores (mínimo, médio e máximo) de sua região de correlação, levando em consideração o tempo e as leituras recentes.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos bolsistas de doutorado, Sr. Leandro A. Villas e Sr. Daniel Ludovico Guidoni.

## Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cyirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Akyildiz, I. F., Vuran, M. C., and Akan, Ö. B. (2004a). On exploiting spatial and temporal correlation in wireless sensor networks. In *In Proceedings of WiOpt 2004: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, pages 71–80.
- Akyildiz, I. F., Vuran, M. C., and Özgür B. Akan (2004b). On exploiting spatial and temporal correlation in wireless sensor networks. In *In Proceedings of WiOpt 2004: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, pages 71–80.
- Chandrakasan, A. P., Smith, A. C., Heinzelman, W. B., and Heinzelman, W. B. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1:660–670.

- Le, T. D., Pham, N. D., and Choo, H. (2008). Towards a distributed clustering scheme based on spatial correlation in wsns. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008. IWCMC '08. International*, pages 529–534.
- Liu, C., Wu, K., and Pei, J. (2007a). An energy-efficient data collection framework for wireless sensor networks by exploiting spatiotemporal correlation. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 18(7):1010–1023.
- Liu, L., Member, S., and Yu, P. S. (2007b). Asap: An adaptive sampling approach to data collection in sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007:1766–1783.
- Nakamura, E. F., Ramos, H. S., Villas, L. A., de Oliveira, H. A. B. F., de Aquino, A. L. L., and Loureiro, A. A. F. (2009). A reactive role assignment for data routing in event-based wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 53:1980–1996.
- Oliveira, H. A., Boukerche, A., Nakamura, E. F., and Loureiro, A. A. (2009). Localization in time and space for wireless sensor networks: An efficient and lightweight algorithm. *Performance Evaluation*, 66(3-5):209–222.
- Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A., and Chandrakasan, A. (2001). Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '01*, pages 272–287, New York, NY, USA. ACM.
- Sinalgo (2008). Simulator for network algorithms. Distributed Computing Group - ETH-Zurich, last visited in October, 2008.
- Villas, L. A., Guidoni, D. L., Araújo, R. B., Boukerche, A., and Loureiro, A. A. (2010). A scalable and dynamic data aggregation aware routing protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 13th ACM international conference on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems, MSWIM '10*, pages 110–117, New York, NY, USA. ACM.
- Yoon, S. and Shahabi, C. (2005). Exploiting spatial correlation towards an energy efficient clustered aggregation technique (cag) [wireless sensor network applications]. In *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, volume 5, pages 3307–3313 Vol. 5.
- Younis, O., Krunz, M., and Ramasubramanina, S. (2006). Node clustering in wireless sensor networks: Recent developments and deployment challenges. *IEEE Network*, 20(3):20–25.
- Yuan, J. and Chen, H. (2009). The optimized clustering technique based on spatial-correlation in wireless sensor networks. In *Information, Computing and Telecommunication, 2009. YC-ICT '09. IEEE Youth Conference on*, pages 411–414.