

# Aprendizaje por refuerzo y técnicas generativas.

---

Deep Q Network (DQN)

# Introducción a Deep Q-learning

# Introducción

---

Previamente en "Aprendizaje por refuerzo", se ha introducido una de sus técnicas más populares: el *Q-learning*. Y además, se han establecido las bases hablando de procesos de decisión de Markov, políticas y funciones de valor.

En este apartado extenderemos las técnicas de ***Q-Learning*** clásico incorporando el uso de *redes neuronales*, dando pie a la evolución a los modelos de ***Deep Q Network***.

Algunos conocimientos de Deep Learning y recursos recomendados de interes:

- <https://www.coursera.org/learn/neural-networks-deep-learning>
- [https://www.tensorflow.org/guide/core/mlp\\_core](https://www.tensorflow.org/guide/core/mlp_core)
- [https://www.tensorflow.org/agents/tutorials/0\\_intro\\_rl?hl=es-419](https://www.tensorflow.org/agents/tutorials/0_intro_rl?hl=es-419)

# Un poco de historia

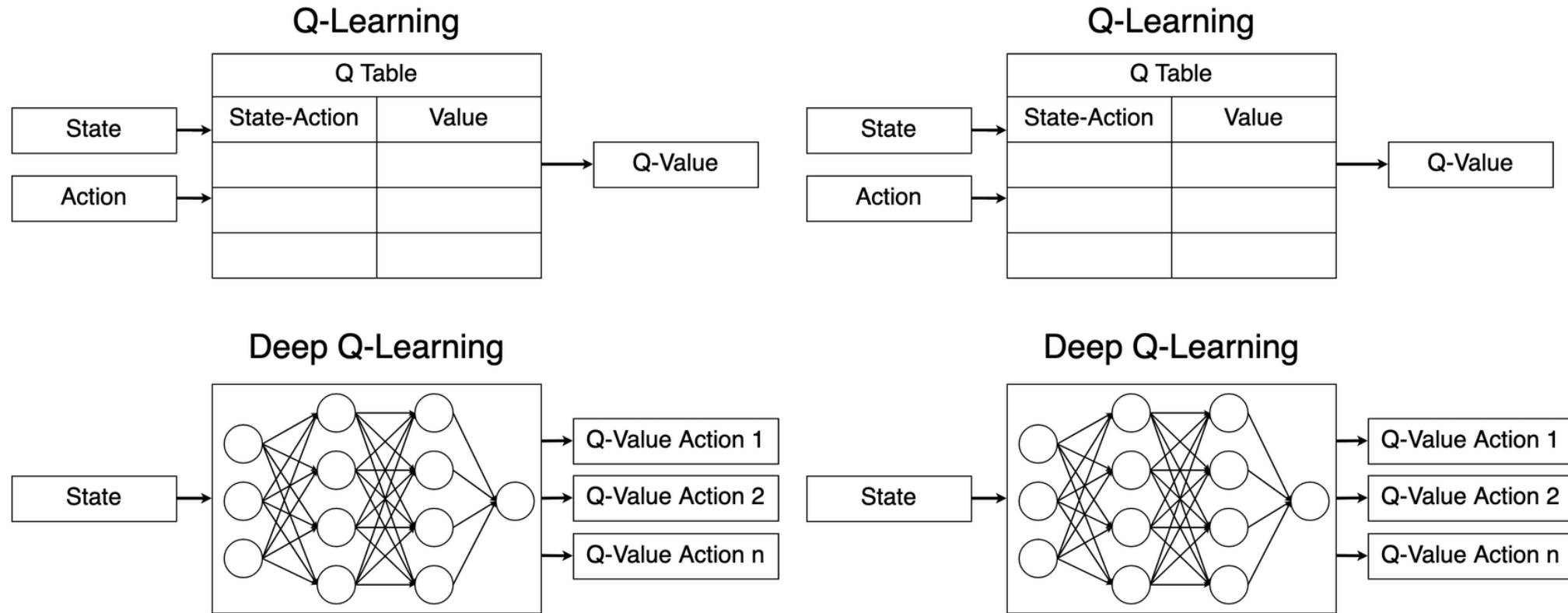
---

En **2015**, *DeepMind*, siendo ya parte de Google, presentó un avance en el campo del aprendizaje por refuerzo profundo con la introducción de **Deep Q Network (DQN)**, marcando el comienzo del campo conocido hoy como *Deep Reinforcement Learning*.

**DQN** cambia la forma en que se aborda el aprendizaje automático en entornos de toma de decisiones secuenciales.

- En lugar de procesar datos estáticos (imágenes o texto), el aprendizaje por refuerzo implica aprender a tomar decisiones secuenciales mientras se maximiza una recompensa acumulativa.
- **DQN** se lanzó en un videojuego de **Atari**, utilizando solo píxeles de la pantalla y retroalimentación de recompensa sencilla, logrando superar el rendimiento de los "expertos/frikies" en varios juegos, incluidos títulos icónicos como Breakout, Space Invaders y Pong.
- La capacidad de **DQN** radica aprender directamente de la experiencia, o más bien del escenario que se crea en cada instante, y tomar decisiones óptimas en entornos complejos.
- Todo esto allanó el camino para aplicaciones en campos como la robótica, los sistemas de control, la gestión de inventario, los vehículos autónomos y más.

# Q-Learning vs. Deep Q-Learning



- En **Q-Learning** usamos la tablas de estados y acciones, o Q-valores.
- En **Deep Q-Learning** utilizamos una red neuronal que aproxima o minimiza la función que aproxima esos Q-valores.

# Q-Learning vs. Deep Q-Learning

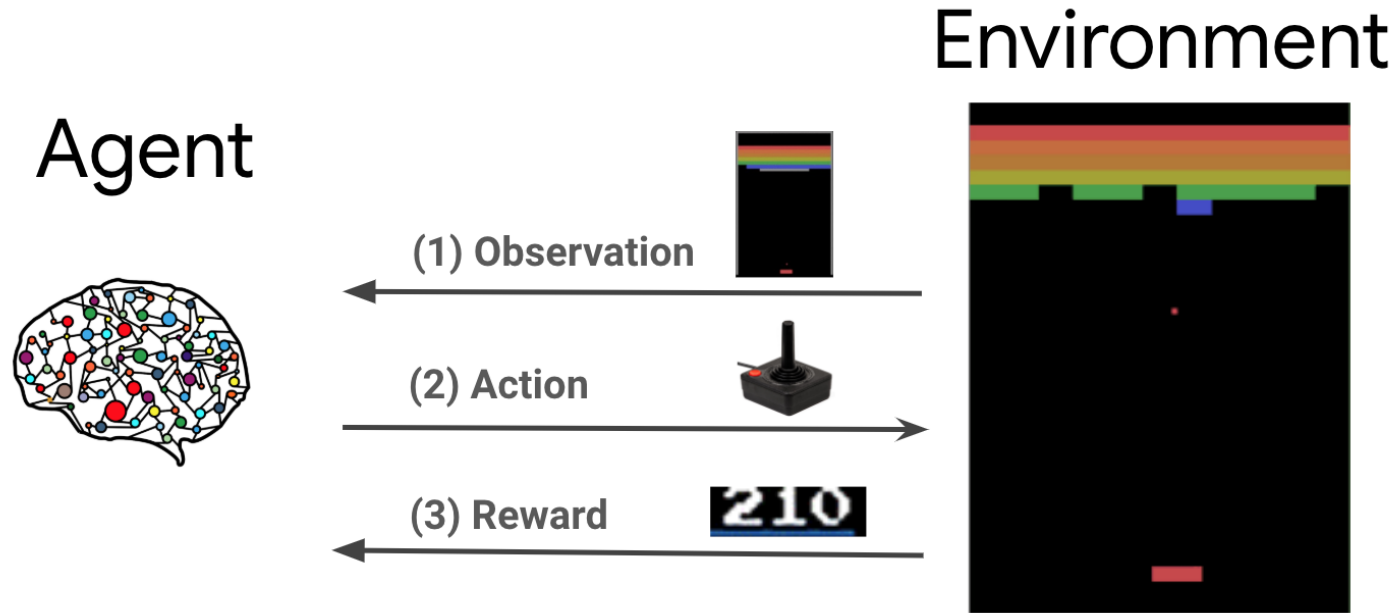
---

El uso de **redes neuronales** tiene varios propósitos importantes en comparación con el enfoque tradicional de Q-Learning:

- **Aproximación de la función Q:** En Q-Learning la tabla que almacena los Q-valores de cada par estado-acción posible, haciendo dependiente de la complejidad del problema. Una **red neuronal** permite aproximar la función Q, lo que significa que **cedemos** a la red el aprender una representación de la función Q, como si generase su propia Q-tabla.
- **Generalización y abstracción:** Las redes neuronales por definición buscan generalizar a partir de ejemplos y extraer características relevantes de los datos de entrada.
- **Escalabilidad:** en Q-Learning vemos limitadas nuestras acciones por como de compleja podamos generar nuestra Q-tabla, las redes neuronales permiten manejar datos de alta dimensionalidad y extraer características relevantes para la toma de decisiones.
- **Aprendizaje de representaciones jerárquicas:** aprenden representaciones jerárquicas de los datos, lo que les permite capturar características tanto a nivel bajo (como bordes y texturas en una imagen) como a nivel alto (como objetos y patrones).

# El agente y su entorno

---



El **agente** y el **entorno** interactúan continuamente entre sí, cada iteración el agente toma una acción en el entorno donde varía la observación actual, y recibe una recompensa y la siguiente observación desde el entorno.

El objetivo es mejorar el agente en cada iteración para maximizar la suma de recompensas.

# El entorno de Cartpole

**Cartpole** es uno de los problemas de aprendizaje de refuerzo **clásicos** ("Hola, mundo!"). Un poste está sujeto a un carro, que puede moverse a lo largo de una pista sin fricción. El poste comienza en posición vertical y el objetivo es evitar que se caiga controlando el carro.

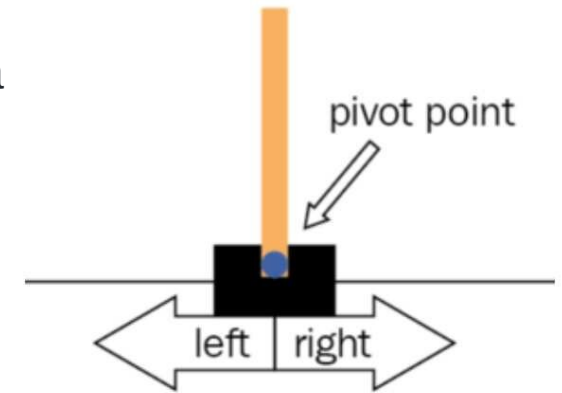
La observación del entorno es un vector 4D representa la posición y la velocidad del carro, y el ángulo y la velocidad angular del polo. El agente puede controlar el sistema mediante 2 acciones, empujar a la derecha (1) o izquierda (-1).

Las claves del juego vienen dadas por:

- La recompensa se da según pasa el tiempo y el palo permanece vertical.
- El juego termina cuando el poste se inclina por encima de algún límite o el carro se mueve fuera de los bordes del mundo.
- El objetivo del agente es aprender a maximizar la suma de recompensas.

["Tutorial DQN de Cartpole en Tensorflow"](#)

["Tutorial DQN de Cartpole en Pytorch"](#)





# Deep Q-Learning

---

**Deep Q-Network o DQN** combina la idea del Q-learning aplicando *redes neuronales*.

- Usa ***una red neuronal*** para aproximar la ***función  $Q$***  (En realidad, utiliza dos redes neuronales para estabilizar el proceso de aprendizaje).
- La ***red neuronal principal (main Neural Network)***, representada por los parámetros  $\theta$ , se utiliza para estimar los ***valores- $Q$***  del estado  $s$  y acción  $a$  actuales:  $Q(s, a; \theta)$ .
- La ***red neuronal objetivo (target Neural Network)***, parametrizada por  $\theta'$ , tendrá la misma arquitectura que la red principal pero se usará para aproximar los ***valores- $Q$***  del siguiente estado  $s'$  y la siguiente acción  $a'$ .

# Deep Q-Learning - Ecuación de Bellman

---

La función de Bellman cambia para adaptarse a las redes neuronales partiendo de:

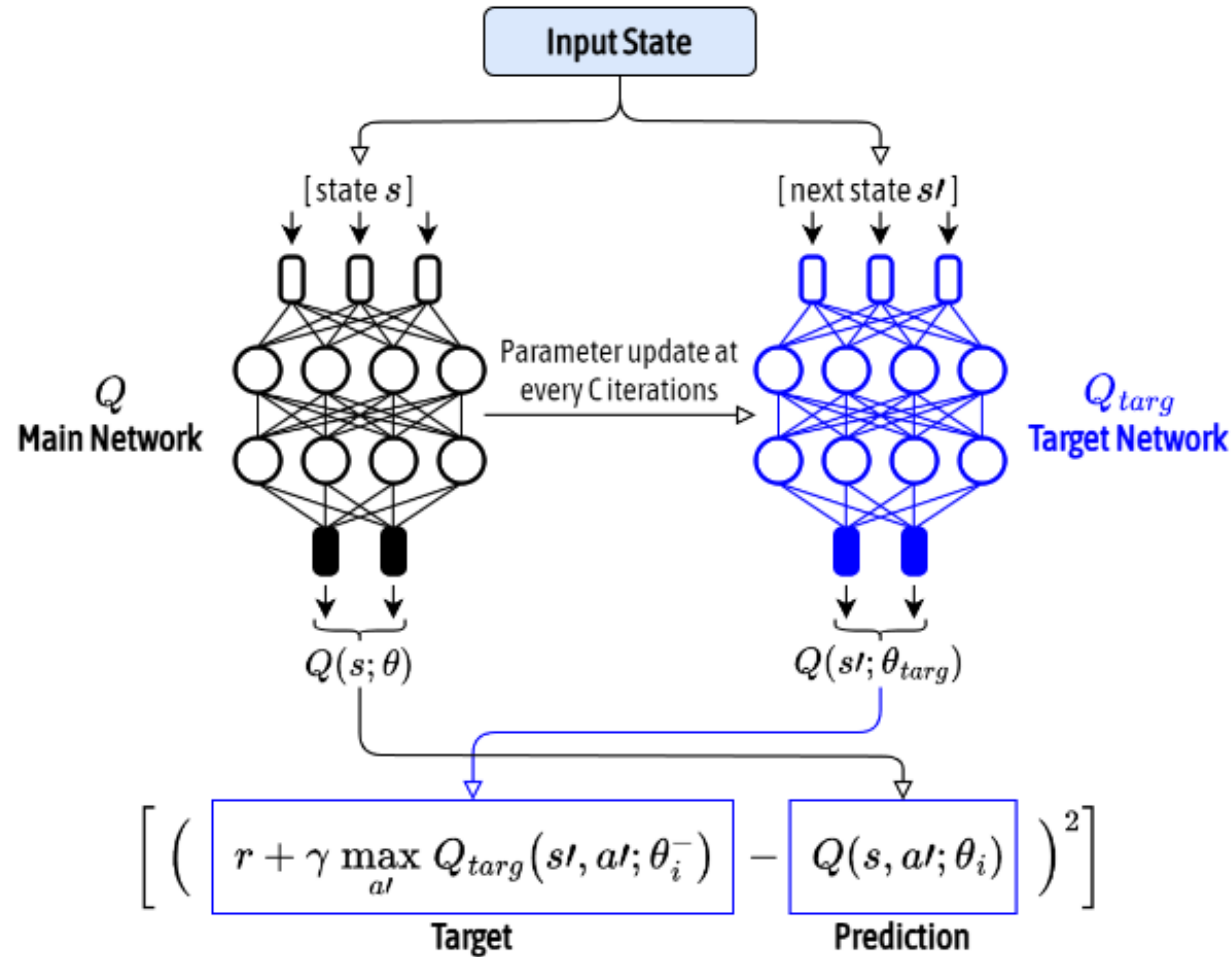
$$Q(s, a; \theta) = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta')$$

La adaptación de la ecuación se debe a la necesidad de una **función de pérdida** (**loss function**) definida como el cuadrado de la diferencia entre ambos lados de la ecuación.

$$\left[ \left( \underbrace{r + \gamma \max_{a'} Q_{targ}(s', a'; \theta_i^-)}_{\text{Target}} - \underbrace{Q(s, a'; \theta_i)}_{\text{Prediction}} \right)^2 \right]$$

Al convertirlo en una **loss function** el objetivo de la red será minimizar usando el algoritmo de descenso de gradientes (viene definida dentro de las librerías de **TensorFlow** o **PyTorch**).

# Deep Q-Learning - [wikidocs](#)



# Deep Q-Learning - train()

---

La función *train()*, *fit()*, *train\_on\_batch()* solo ocurre **en la red principal** y en la objetivo se utilizará *predict()*.

- El entrenamiento tiene un paso inicial o **arranque en frío** para generar los primeros escenarios.
- La **red objetivo se congela** (sus parámetros) durante varias iteraciones (2000~10000).
- Después de las iteraciones predefinidas, **los parámetros de la red principal se copian** a la **red objetivo**, transmitiendo así el aprendizaje de una a otra, haciendo que las estimaciones calculadas por la red objetivo sean más precisas.

# Deep Q-Learning - pseudo-código *step 1*

---

## 1. Inicialización o *arranque en frío*:

- i. Inicializar la red neuronal profunda Q (*main\_nn*) con pesos aleatorios.
- ii. Inicializar el estado inicial del entorno (p.e. Cartpole).
- iii. Realizar un "arranque en frío" para ***poblar el búfer de reproducción***:
  - a. Realizar acciones aleatorias en el entorno durante un número predefinido de pasos.
  - b. Almacenar cada transición (estado, acción, recompensa, nuevo estado) en el búfer de reproducción.

# Deep Q-Learning - pseudo-código *step 2*

---

2. Para cada episodio (¡Recordar! - para cada grabación de diferentes jugadas):

i. **Reiniciar el estado inicial del entorno.**

ii. **Para cada paso del episodio:**

- a. Elegir una acción utilizando una política de exploración/exploitación (por ejemplo, epsilon-greedy).
- b. Ejecutar la acción en el entorno y observar la recompensa y el nuevo estado.
- c. Almacenar la transición (estado, acción, recompensa, nuevo estado) en el búfer de reproducción.
- d. Muestrear un lote de transiciones del búfer de reproducción.

e. Para cada transición en el lote:

a. Calcular el valor objetivo:

$$target = reward + discount\_factor * max(Q(new\_state, action))$$

- reward es la recompensa recibida por tomar la acción.
- discount\_factor es el factor de descuento que pondera las recompensas futuras.
- $Q(new\_state, action)$  es el valor de la acción óptima estimada para el nuevo estado.

b. Calcular el error cuadrático medio (MSE) entre el valor objetivo y el valor estimado:

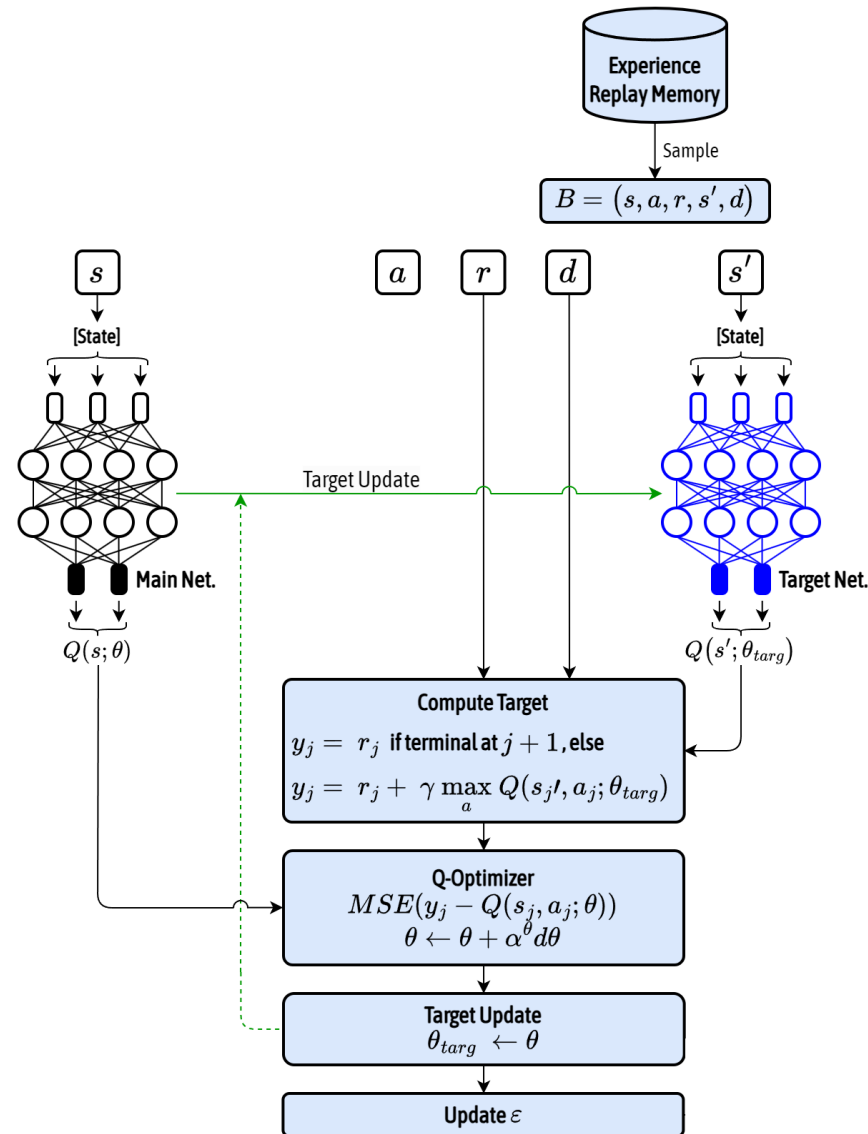
$$loss = (target - Q(state, action))^2$$

c. Realizar un paso de retropropagación (backpropagation) para minimizar el error cuadrático medio.

f. Actualizar el estado actual al nuevo estado.

iii. **Reducir el valor de epsilon si se está utilizando una política epsilon-greedy.**

# Deep Q-Learning - esquema del entrenamiento



# DQN: Creación de las redes neuronales

```
class DQN(tf.keras.Model):
    """Perceptron multicapa de 2 capas de 32 y una se salida"""
    def __init__(self):
        super(DQN, self).__init__()
        self.dense1 = tf.keras.layers.Dense(32, activation="relu")
        self.dense2 = tf.keras.layers.Dense(32, activation="relu")
        self.dense3 = tf.keras.layers.Dense(num_actions, dtype=tf.float32) # No activation

    def call(self, x):
        """Construcción de las capas"""
        x = self.dense1(x)
        x = self.dense2(x)
        return self.dense3(x)

main_nn = DQN() # Red principal
target_nn = DQN() # Red objetivo

optimizer = tf.keras.optimizers.Adam(1e-4) #Optimizados Adam
mse = tf.keras.losses.MeanSquaredError() #Loss function MSE
```



# DQN: Creación del buffer para la experiencia

```
class ReplayBuffer(object):
    """Experience replay buffer that samples uniformly."""
    def __init__(self, size):
        self.buffer = deque(maxlen=size)

    def add(self, state, action, reward, next_state, done):
        self.buffer.append((state, action, reward, next_state, done))

    def __len__(self):
        return len(self.buffer)

    def sample(self, num_samples):
        states, actions, rewards, next_states, done = [], [], [], [], []
        idx = np.random.choice(len(self.buffer), num_samples)
        for i in idx:
            elem = self.buffer[i]
            state, action, reward, next_state, done = elem
            states.append(np.array(state, copy=False))
            actions.append(np.array(action, copy=False))
            rewards.append(reward)
            next_states.append(np.array(next_state, copy=False))
            done.append(done)
        states = np.array(states)
        actions = np.array(actions)
        rewards = np.array(rewards, dtype=np.float32)
        next_states = np.array(next_states)
        done = np.array(done, dtype=np.float32)
        return states, actions, rewards, next_states, done
```

# DQN: función *epsilon-greedy()* y *train\_step()*

```
def select_epsilon_greedy_action(state, epsilon):
    """Acción aleatoria con probabilidad menor que epsilon, en otro caso la mejor."""
    result = tf.random.uniform((1,))
    if result < epsilon:
        return env.action_space.sample() # Elegimos una acción aleatoria
    else:
        return tf.argmax(main_nn(state)[0]).numpy() # Elección de acción Greedy.

@tf.function # Configuración de cada iteración de entrenamiento
def train_step(states, actions, rewards, next_states, done):
    # Cálculo de los objetivos (segunda red)
    next_qs = target_nn(next_states)
    max_next_qs = tf.reduce_max(next_qs, axis=-1)
    target = rewards + (1. - done) * discount * max_next_qs
    with tf.GradientTape() as tape:
        qs = main_nn(states)
        action_masks = tf.one_hot(actions, num_actions)
        masked_qs = tf.reduce_sum(action_masks * qs, axis=-1)
        loss = mse(target, masked_qs)
    grads = tape.gradient(loss, main_nn.trainable_variables)
    optimizer.apply_gradients(zip(grads, main_nn.trainable_variables))
    return loss
```

# DQN: Hyperparámetros y entrenamiento

```
# Hyperparámetros
num_episodes = 1000
epsilon = 1.0
batch_size = 32
discount = 0.99
buffer = ReplayBuffer(100000)
cur_frame = 0

# Comienzo del entrenamiento. Jugamos una vez y entrenamos con un batch.
last_100_ep_rewards = []
for episode in range(num_episodes+1):
    state = env.reset() #reseteo del ecosistema
    ep_reward, done = 0, False
    while not done:
        state_in = tf.expand_dims(state, axis=0)
        action = select_epsilon_greedy_action(state_in, epsilon)
        next_state, reward, done, info = env.step(action)
        ep_reward += reward
        # Guardamos el juego.
        buffer.add(state, action, reward, next_state, done)
        state = next_state
        cur_frame += 1
    # CoCopiamos los pesos de main_nn a target_nn.
    if cur_frame % 2000 == 0:
        target_nn.set_weights(main_nn.get_weights())
```

# DQN: resto del código

```
# Entrenamiento de la red neuronal.
if len(buffer) >= batch_size:
    states, actions, rewards, next_states, done = buffer.sample(batch_size)
    loss = train_step(states, actions, rewards, next_states, done)

if episode < 950:
    epsilon -= 0.001

if len(last_100_ep_rewards) == 100:
    last_100_ep_rewards = last_100_ep_rewards[1:]
    last_100_ep_rewards.append(ep_reward)

if episode % 50 == 0:
    print(f'Episode {episode}/{num_episodes}. Epsilon: {epsilon:.3f}. '
          f'Reward in last 100 episodes: {np.mean(last_100_ep_rewards):.3f}')
env.close()
```

# Double DQN y Dueling DQN

# Algoritmos avanzados de DQN

---

El algoritmo de ***Deep Q-Network***, es capaz de solucionar problemas complejos, pero también tiene deficiencias.

Por ello, aparecen algoritmos aportando mejoras como lo son ***Double Deep Q-Network*** (Double DQN) y ***Dueling Deep Q-Network*** (Dueling DQN).

Ambos modelos tienen la capacidad para ***mejorar la estabilidad y eficacia del aprendizaje*** por refuerzo en entornos desafiantes.

# Double Deep Q-Network

---

**Double DQN** surge para mitigar el sesgo que **comete algoritmo DQN** al sobreestimar las recompensas reales; es decir, los valores-Q que genera, piensa que va a obtener una recompensa mayor de la que tendrá en realidad.

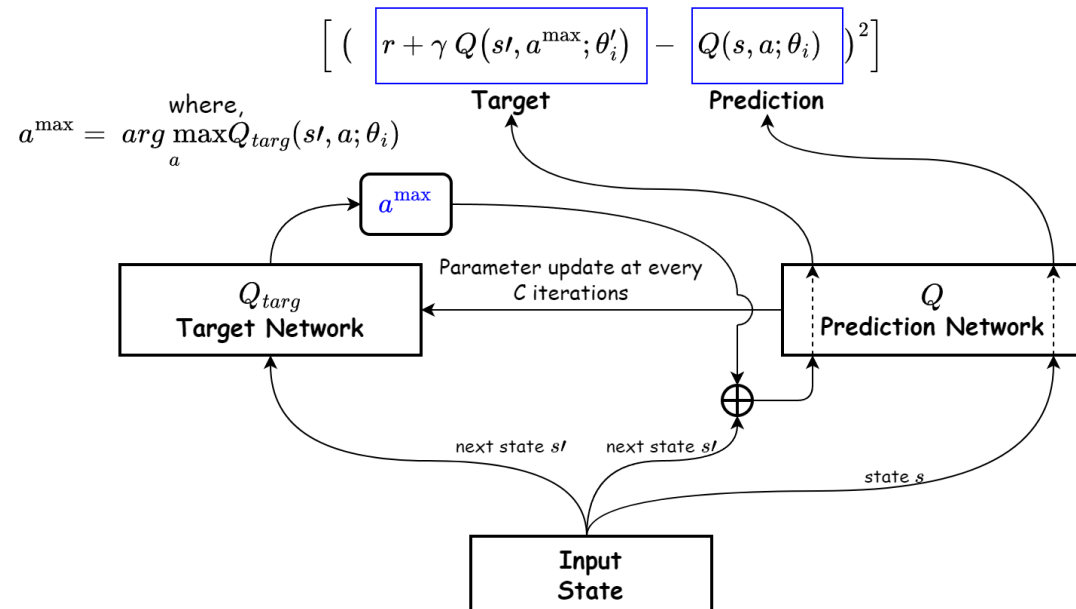
**Double DQN** propone separar la selección y la evaluación de una acción en dos pasos, usando **dos redes neuronales** para estimar los valores de acción y actualizarlas de manera independiente.

$$Q(s, a; \theta) = r + \gamma Q(s', \operatorname{argmax}_{a'} Q(s', a'; \theta); \theta')$$

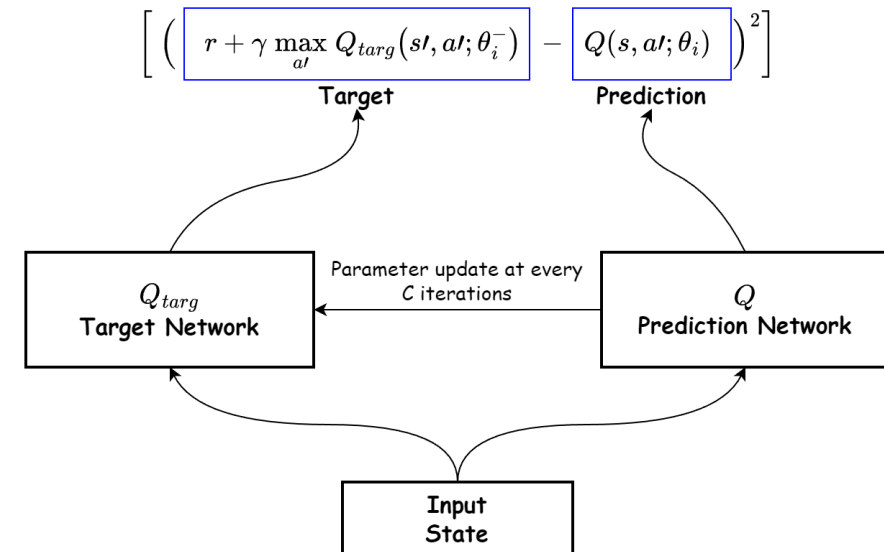
Este modelo añade un paso, de la red neuronal principal  $\theta$  que decide cuál es la mejor acción entre todas las posibles, hace pasar ese resultado sobre la **red objetivo** que evalúa esa acción para conocer su **valor-Q**.

# Double Deep Q-Network

## Double Deep Q-Network



## Deep Q-Network





# Dueling Deep Q-Network

---

Este algoritmo divide los **valores-Q en dos partes distintas**, la función de valor (value function)  $V(s)$  y la función de ventaja (advantage function)  $A(s, a)$ .

- La **función de valor  $V(s)$**  nos dice cuánta recompensa obtendremos desde el estado  $s$ .
- La **función de ventaja  $A(s, a)$**  nos dice cuánto mejor es una acción respecto a las demás.
- Combinando el valor  $V$  y la ventaja  $A$  de cada acción, obtenemos los valores-Q:

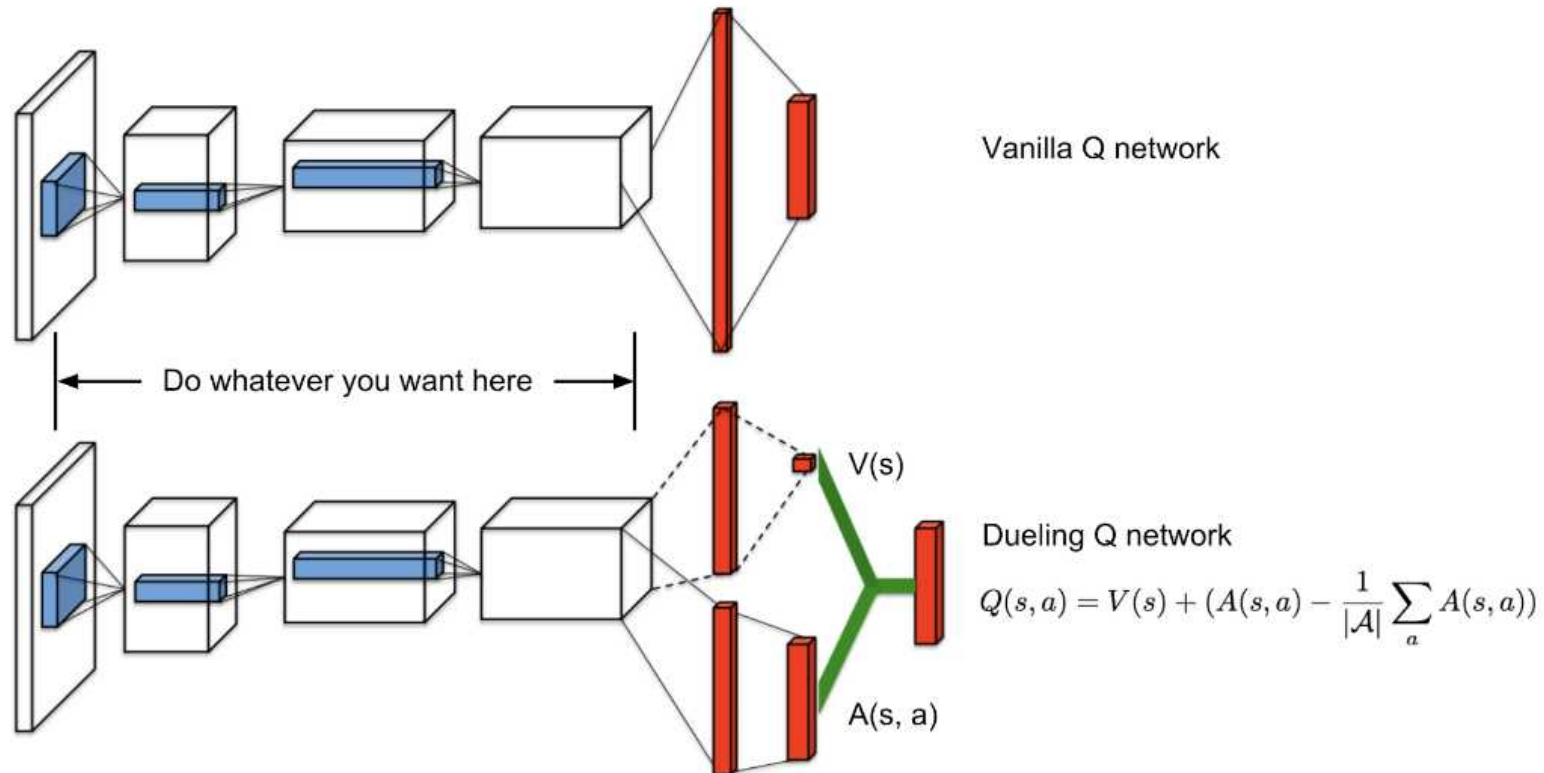
$$Q(s, a) = V(s) + A(s, a)$$

# Dueling Deep Q-Network

**Dueling DQN** divide la capa final de la red en dos:

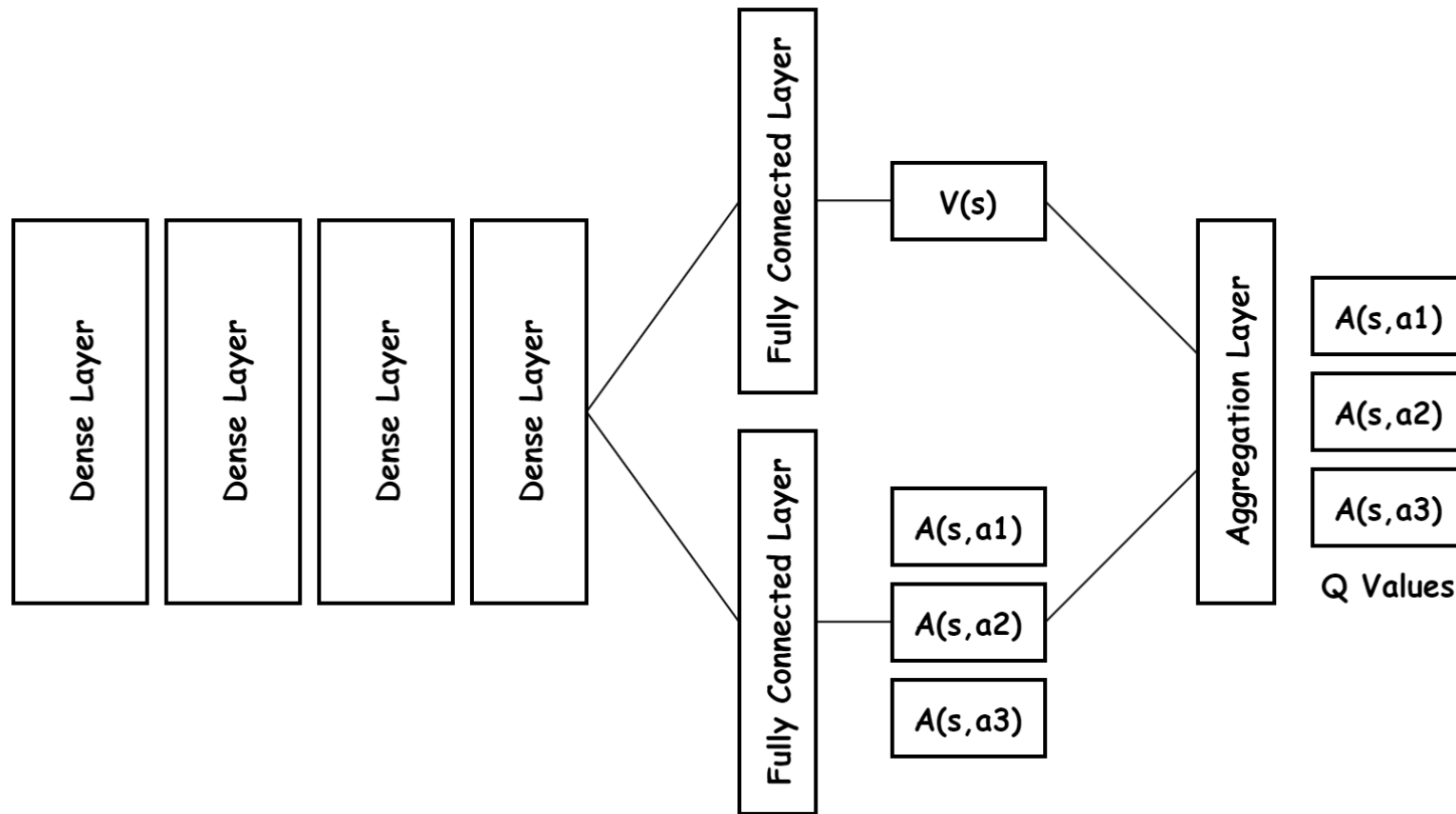
1. Estima el valor del estado  $s \rightarrow V(s)$
2. Estima la ventaja de cada acción  $a \rightarrow A(s, a)$

La unión de ambas partes estima los **valores-Q**  $\rightarrow Q = V + A - \text{mean}(A)$ .



# Dueling Deep Q-Network

Es importante mantener el número de Q-valores tanto en la capa final como en la interna de evaluación de acciones.



# DDQN: estructura CNN de la red

```
class DuelingDQN(tf.keras.Model):  
    """CNN para juegos de Atari."""  
    def __init__(self, num_actions):  
        super(DuelingDQN, self).__init__()  
        self.conv1 = tf.keras.layers.Conv2D(  
            filters=32, kernel_size=8, strides=4, activation="relu",  
        )  
        self.conv2 = tf.keras.layers.Conv2D(  
            filters=64, kernel_size=4, strides=2, activation="relu",  
        )  
        self.conv3 = tf.keras.layers.Conv2D(  
            filters=64, kernel_size=3, strides=1, activation="relu",  
        )  
        self.flatten = tf.keras.layers.Flatten()  
        self.dense1 = tf.keras.layers.Dense(units=512, activation="relu")  
        self.V = tf.keras.layers.Dense(1)  
        self.A = tf.keras.layers.Dense(num_actions)
```

# Dueling Deep Q-Network: Código

---

```
@tf.function
def call(self, states):
    """Forward pass of the neural network with some inputs."""
    x = self.conv1(states)
    x = self.conv2(x)
    x = self.conv3(x)
    x = self.flatten(x)
    x = self.dense1(x)
    V = self.V(x)
    A = self.A(x)
    Q = V + tf.subtract(A, tf.reduce_mean(A, axis=1, keepdims=True))
    return Q
```

[Código en tensorflow](#)

[Código en Pytorch](#)

# Dueling Deep Q-Network: Código entrenamiento

```
@tf.function
def train_step(states, actions, rewards, next_states, done):
    # Selección de la proxima mejor acción con main_nn.
    next_qs_main = main_nn(next_states)
    next_qs_argmax = tf.argmax(next_qs_main, axis=-1)
    next_action_mask = tf.one_hot(next_qs_argmax, num_actions)

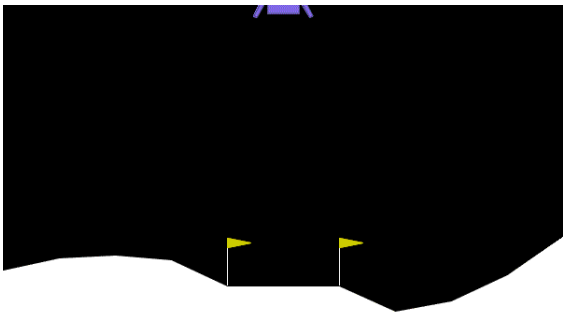
    # Evaluamos la mejor acción con target_nn para sacar el Q-value.
    next_qs_target = target_nn(next_states)
    masked_next_qs = tf.reduce_sum(next_action_mask * next_qs_target, axis=-1)

    # Creamos el objetivo usando la recompensa y el descuento del proximo Q-value.
    target = rewards + (1. - done) * discount * masked_next_qs
    with tf.GradientTape() as tape:
        qs = main_nn(states) # Q-values del estado actual.
        action_mask = tf.one_hot(actions, num_actions)
        masked_qs = tf.reduce_sum(action_mask * qs, axis=-1)
        loss = loss_fn(target, masked_qs)

    grads = tape.gradient(loss, main_nn.trainable_variables)
    optimizer.apply_gradients(zip(grads, main_nn.trainable_variables))
    return loss
```

# Lunar Lander

Es parte de la libreria de Gymnasium, y uno de los entornos dentro de Box2D.



Action Space	Discrete(4)
Observation Shape	(8,)
Observation High	[1.5 1.5 5. 5. 3.14 5. 1. 1. ]
Observation Low	[-1.5 -1.5 -5. -5. -3.14 -5. -0. -0. ]
Import	<code>gym.make("LunarLander-v2")</code>

s[0]	s[1]	s[2]	s[3]	s[4]	s[5]	s[6]	s[7]
X	Y	Speed X	Speed Y	Ángulo	Ang. Speed	1º pata tiene contacto sino 0	2º pata tiene contacto sino 0

**Acciones:**

- 1. no hacer nada
- 2. encender motor izquierdo
- 3. encender motor principal
- 4. encender motor derecho

# Actor-Critic



# Recopilando

---

Desde el principio hemos obviado como clasificar los modelos de Aprendizaje por refuerzo, pero hay que situarse en contexto para seguir avanzando:

## 1. Modelos basados en el conocimiento del entorno

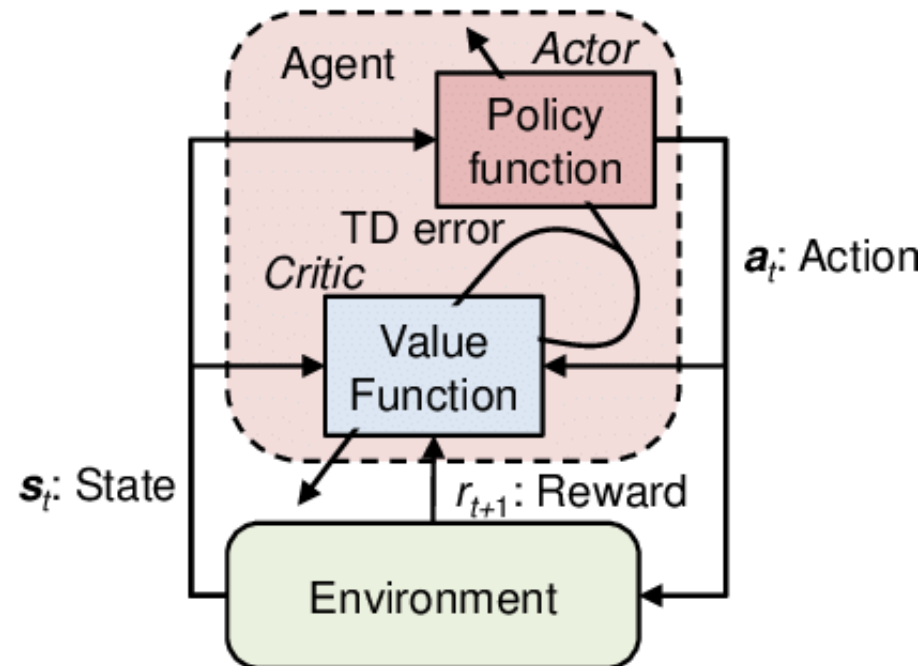
- ***Aprendizaje basado en el modelo***: el agente tiene un conocimiento explícito del entorno y puede predecir como reacciona el entorno para cada acción. (Model-Based Reinforced Learning)
- ***Aprendizaje basado en el modelo libre***: el agente no tiene un conocimiento explícito y debe aprender a partir de la interacción directa con él. (Q-Learning)

## 2. Modelos basados en el tipo de aprendizaje

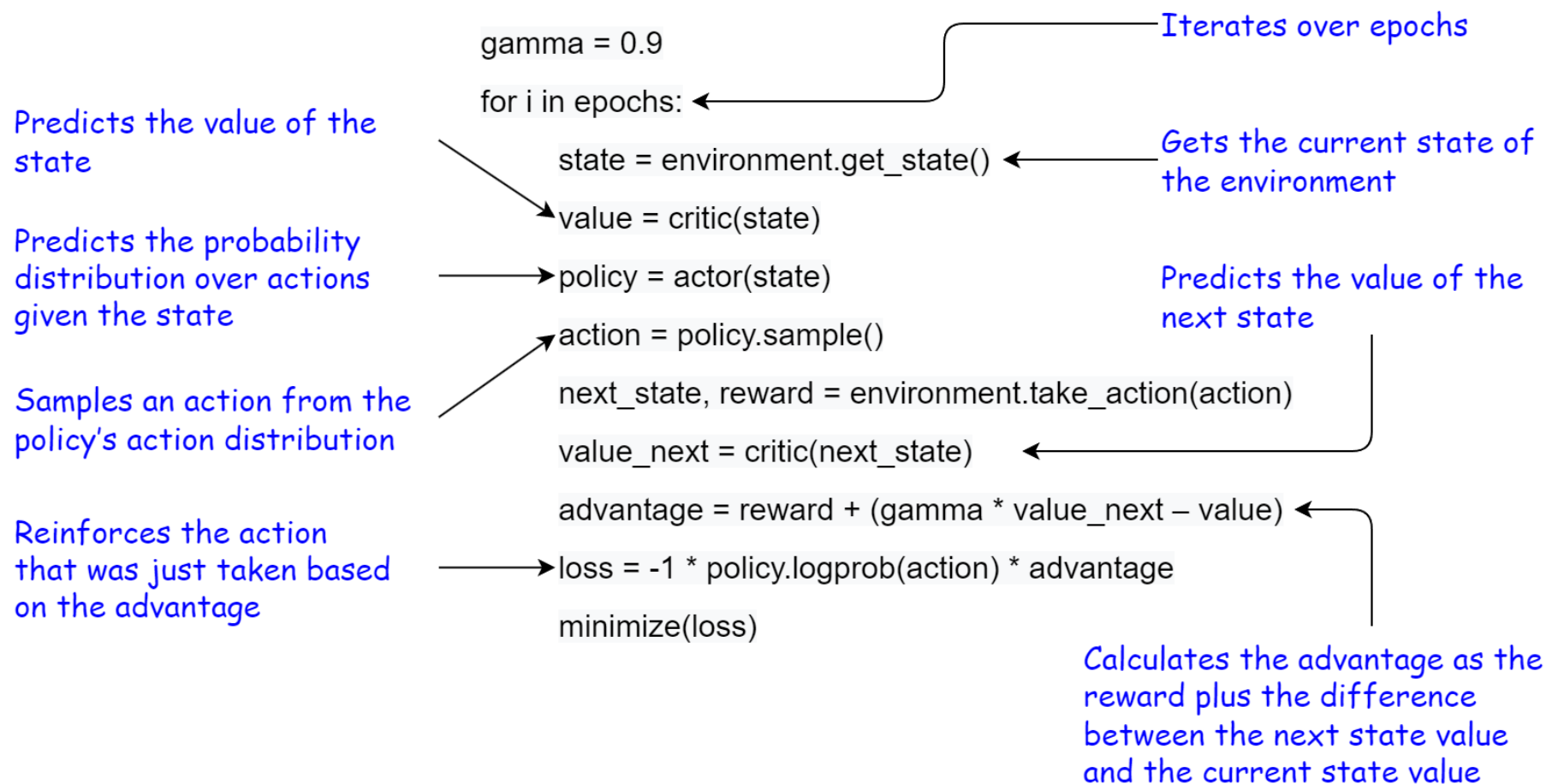
- ***Aprendizaje de valor***: el agente aprende a estimar la función de valor, la información que recibe en cada decisión guía el comportamiento del agente. (Deep Q-Learning)
- ***Aprendizaje de política***: el agente aprende una política óptima sin necesidad de estimar la función de valor, la política puede ser determinista o estocástica (Policy Gradiente o Advantage Actor-Critic)

# Actor-Critic [5]

**Actor-Critic** es una combinación de métodos basados en el valor y basados en la política, donde **el Actor controla cómo se comporta nuestro agente** utilizando Policy gradient, y **el Crítico evalúa qué tan buena es la acción tomada** por el Agente basándose en la función de valor.



# Actor-Critic



# Recursos didácticos

---

1. Mnih, V. et al. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. Nature, 518(7540), 529.
2. Wang, Ziyu, et al. “Dueling network architectures for deep reinforcement learning.” arXiv preprint arXiv:1511.06581 (2015)
3. Van Hasselt, Hado, Arthur Guez, and David Silver. “Deep reinforcement learning with double q-learning.” Thirtieth AAAI conference on artificial intelligence. 2016
4. Tensorflow tutoriales de agentes para aprendizaje por refuerzo
5. Deep Multi-Agent Reinforcement Learning using DNN-Weight Evolution to Optimize Supply Chain Performance